

BAGIAN III :

PROSES PENGOLAHAN

SECARA FISIK – KIMIA

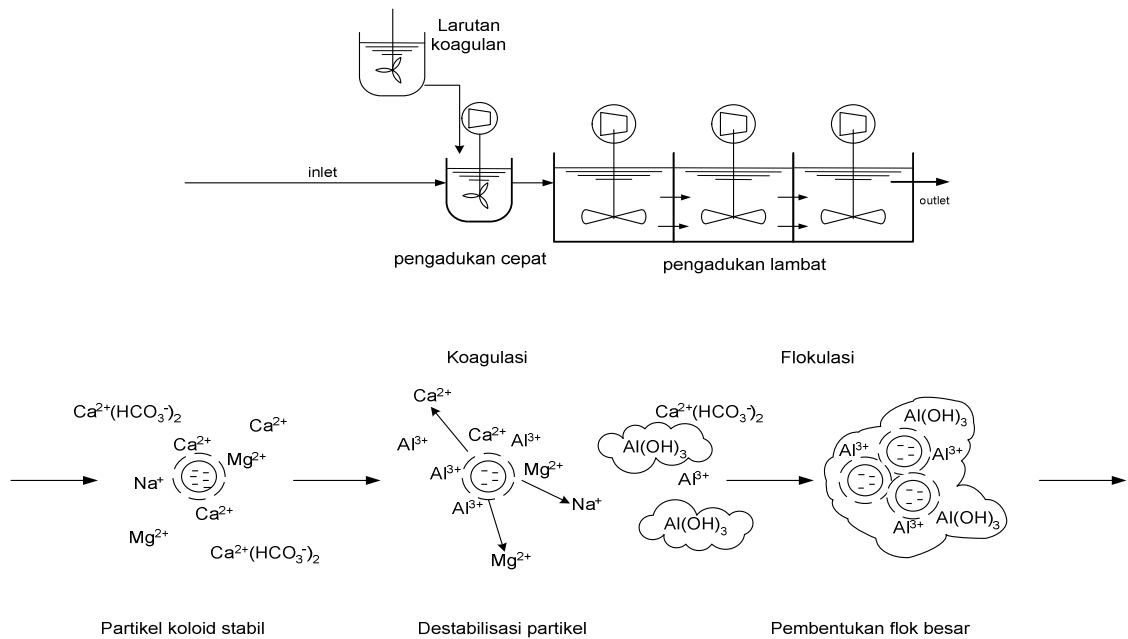
BAB 5

KOAGULASI – FLOKULASI

RINGKASAN

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa dapat menjelaskan proses koagulasi-flokulasi yang dapat dijelaskan secara ringkas pada Gambar 5.1, dengan penjelasan sebagai berikut:

1. Partikel koloid tidak bisa mengendap karena bersifat stabil.
2. Kestabilan koloid dapat diganggu dengan penambahan koagulan dan pengadukan cepat.
3. Partikel yang tidak stabil cenderung untuk saling berinteraksi dan bergabung membentuk flok yang berukuran besar.



Gambar 5. 1 Ringkasan Proses Koagulasi dan flokulasi

MATERI

5.1. Kestabilan Partikel

Air baku dari air permukaan sering mengandung bahan-bahan yang tersusun oleh partikel koloid yang tidak bisa diendapkan secara alamiah dalam waktu singkat. Partikel-partikel koloid dibedakan berdasarkan ukuran. Jarak ukurannya antara 0,001 mikron (10^{-6} mm) sampai 1 mikron (10^{-3} mm). Partikel yang ditemukan dalam kisaran ini meliputi (1) partikel anorganik, seperti serat asbes, tanah liat, dan lanau/silt, (2) presipitat koagulan, dan (3) partikel organik, seperti zat humat, virus, bakteri, dan plankton. Dispersi koloid mempunyai sifat memendarkan cahaya. Sifat pemendaran cahaya ini terukur sebagai satuan kekeruhan.

Koloid merupakan partikel yang tidak dapat mengendap secara alami karena adanya stabilitas suspensi koloid. Stabilitas koloid terjadi karena gaya tarik van der Waal's dan gaya tolak/*repulsive* elektrostatik serta gerak brown.

Gaya Van der Waals. Gaya ini merupakan gaya tarik-menarik antara dua massa, yang besarnya tergantung pada jarak antar keduanya. Pada kimia koloid, ikatan Van der Waals adalah lawan dari gaya elektrostatik.

Gaya Elektrostatik. Gaya elektrostatik adalah gaya utama menjaga suspensi koloid pada keadaan yang stabil. Sebagian besar koloid mempunyai muatan listrik. Sifatnya berbeda tergantung sifat dasar koloidnya. Oksida metalik umumnya bermuatan positif, sedangkan oksida nonmetalik dan sulfida metalik umumnya bermuatan negatif. Kestabilan koloid terjadi karena adanya gaya tolak antar koloid yang mempunyai muatan yang sama.

Gerak Brown. Gerak ini adalah gerak acak dari suatu partikel koloid yang disebabkan oleh kecilnya massa partikel.

5.2. Proses Koagulasi-Flokulasi

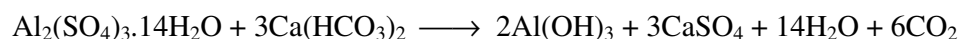
Kestabilan koloid dapat dikurangi dengan proses koagulasi (proses destabilisasi) melalui penambahan bahan kimia dengan muatan berlawanan. Terjadinya muatan pada partikel menyebabkan antar partikel yang berlawanan cenderung bergabung membentuk inti flok. Proses koagulasi selalui diikuti oleh proses flokulasi, yaitu penggabungan inti flok atau flok kecil menjadi flok yang berukuran besar.

Proses koagulasi-flokulasi terjadi pada unit pengaduk cepat dan pengaduk lambat. Pada bak pengaduk cepat, dibubuhkan bahan kimia (disebut koagulan). Pengadukan cepat dimaksudkan agar koagulan yang dibubuhkan dapat tercampur secara merata/homogen. Pada bak pengaduk lambat, terjadi pembentukan flok yang berukuran besar hingga mudah diendapkan pada bak sedimentasi.

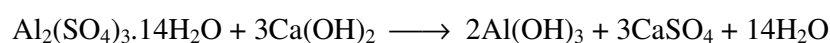
Koagulan yang banyak digunakan dalam pengolahan air minum adalah aluminium sulfat atau garam-garam besi. Kadang-kadang koagulan-pembantu, seperti polielektrolit dibutuhkan untuk memproduksi flok yang cepat mengendap. Faktor utama yang mempengaruhi koagulasi dan flokulasi air adalah kekeruhan, padatan tersuspensi, temperatur, pH, komposisi dan konsentrasi kation dan anion, durasi dan tingkat agitasi selama koagulasi dan flokulasi, dosis koagulan, dan jika diperlukan, koagulan-pembantu. Beberapa jenis koagulan beserta sifatnya dapat dilihat pada Tabel 5.1.

Pemilihan koagulan dan kadarnya membutuhkan studi laboratorium atau pilot plant (menggunakan *jar test apparatus*) untuk mendapatkan kondisi optimum.

Reaksi kimia untuk menghasilkan flok adalah:



Pada air yang mempunyai alkalinitas tidak cukup untuk bereaksi dengan alum, maka perlu ditambahkan alkalinitas dengan menambah kalsium hidroksida.



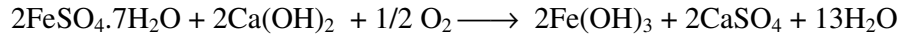
Derajat pH yang optimum untuk alum berkisar 4,5 hingga 8, karena aluminium hidroksida relatif tidak terlarut.

Tabel 5. 1 Beberapa Jenis Koagulan dalam Praktek Pengolahan-Air

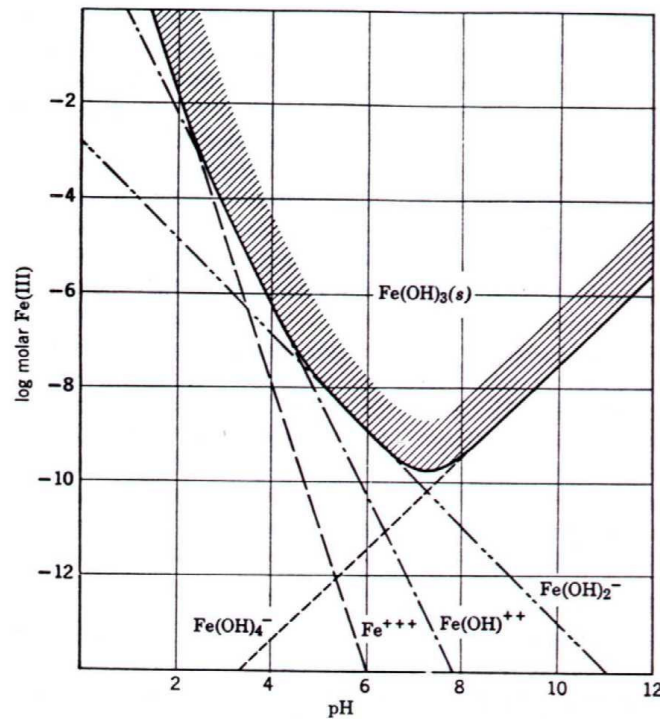
Nama Kimia	Nama Lain	Rumus Kimia	Berat Molekul	Wujud	Densitas bulk, kg/m ³	Specific Gravity	Kelarutan dalam Air, kg/m ³	Kadar Kimia % w/w	Kadar Air % w/w	pH larutan
Aluminium sulfat	Alum	Al ₂ (SO ₄) ₃ .14,3H ₂ O	599,77	Putih terang, padat	1000-1096	1,25-1,36	Sekitar 872	Al: 9,0-9,3		Sekitar 3,5
	Alum cair	Al ₂ (SO ₄) ₃ .49,6H ₂ O	1235,71	Putih atau terang-abu abu kekuningan, cair		1,30-1,34	Sangat larut	Al: 4,0-4,5	71,2-74,5	
Ferri klorida	Besi (III) klorida, Besi triklorida	FeCl ₃	162,21	Hijau-hitam, bubuk	721-962		Sekitar 719	Fe: kira2 34		
	Ferri klorin cair	FeCl ₃ .6H ₂ O	270,30	Kuning-coklat, bongkahan	962-1026		Sekitar 814	Fe: 20,3-21,0		
		FeCl ₃ .13,1H ₂ O	398,21	Coklat kemerahan, cair		1,20-1,48	Sangat larut	Fe: 12,7-14,5	56,5-62,0	0,1-1,5
Ferri sulfat	Besi (III) sulfat, Besi persulfat	Fe ₂ (SO ₄) ₃ .9H ₂ O	562,02	Merah-coklat, bubuk	1122-1154			Fe: 17,9-18,7		
	Ferri sulfat cair	Fe ₂ (SO ₄) ₃ .36,9H ₂ O	1064,64	Coklat kemerahan, cair		1,40-1,57	Sangat larut	Fe: 10,1-12,0	56,5-64,0	0,1-1,5
Ferro sulfat	<i>Copperas</i>	FeSO ₄ .7H ₂ O	278,02	Hijau, bongkahan kristal	1010-1058			Fe: Sekitar 20		

Sumber: Qasim, et al. (2000)

Ferro sulfat membutuhkan alkalinitas dalam bentuk ion hidroksida agar menghasilkan reaksi yang cepat. Untuk itu, Ca(OH)_2 ditambahkan untuk mendapatkan pH pada level di mana ion besi diendapkan sebagai Fe(OH)_3 , lihat Gambar 5.2. Reaksi ini adalah reaksi oksidasi-reduksi yang membutuhkan oksigen terlarut dalam air. Dalam reaksi koagulasi, oksigen direduksi dan ion besi dioksidasi menjadi ferri, di mana akan mengendap sebagai Fe(OH)_3 .

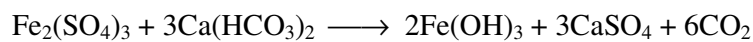


Untuk berlangsungnya reaksi ini, pH harus sekitar 9,5 dan kadang-kadang stabilisasi membutuhkan kapur berlebih.



Gambar 5. 2 Pengaruh pH terhadap kelarutan Fe(III) pada temperatur 25°C
(diambil dari Fair et al, 1981)

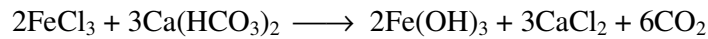
Penggunaan ferri sulfat sebagai koagulan berlangsung mengikuti reaksi:



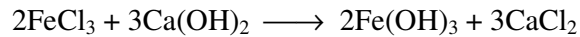
Reaksi ini biasanya menghasilkan flok yang padat dan cepat mengendap. Jika alkalinitas alami tidak cukup untuk reaksi, diperlukan penambahan kapur. Rentang pH

optimum adalah sekitar 4 hingga 12, karena ferri hidroksida relatif tidak larut dalam rentang pH ini.

Reaksi ferri klorida sebagai koagulan berlangsung sebagai berikut:



Penambahan kapur diperlukan bila alkalinitas alami tidak mencukupi.



Reaksi ferri klorida berlangsung pada pH optimum 4 sampai 12. Flok yang terbentuk umumnya padat dan cepat mengendap.

5.3. Pengadukan

Faktor penting pada proses koagulasi-flokulasi adalah pengadukan. Berdasarkan kecepatannya, pengadukan dibedakan menjadi dua, yaitu pengadukan cepat dan pengadukan lambat. Kecepatan pengadukan dinyatakan dengan **gradien kecepatan** (G), yang merupakan fungsi dari tenaga yang disuplai (P):

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}} \quad (5.1)$$

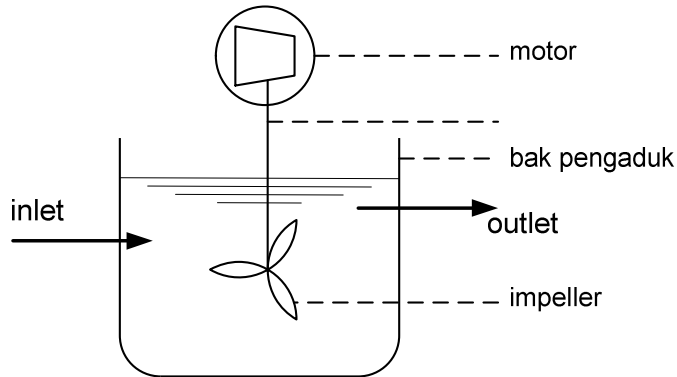
dalam hal ini:

- P = suplai tenaga ke air (N.m/detik)
- V = volume air yang diaduk, m^3
- μ = viskositas absolut air, N.detik/ m^2 .

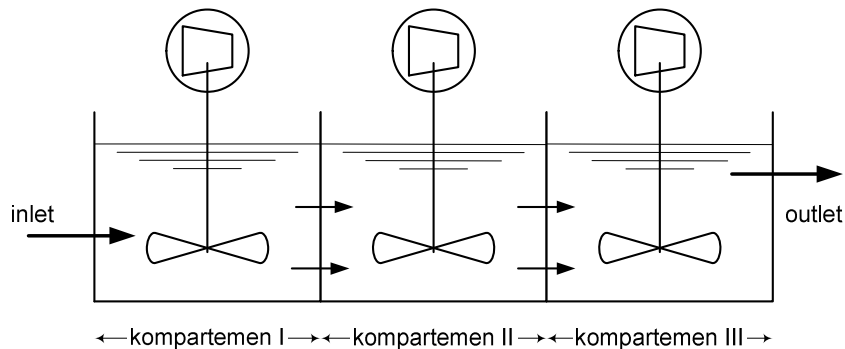
Pengadukan cepat adalah pengadukan yang dilakukan dengan gradien kecepatan besar (300 sampai 1000 detik⁻¹), sementara pengadukan lambat adalah pengadukan yang dilakukan dengan gradien kecepatan kecil (20 sampai 100 detik⁻¹). Waktu pengadukan juga berbeda. Pada pengadukan cepat, waktu yang diperlukan tidak lebih dari 1 menit, sementara pengadukan lambat membutuhkan waktu 15 hingga 60 menit.

Pengadukan dapat dilakukan dengan tiga cara, yaitu cara mekanis, cara hidrolis, dan cara pneumatis.

Pengadukan mekanis adalah metoda pengadukan menggunakan alat pengaduk berupa *impeller* yang digerakkan dengan motor bertenaga listrik. Umumnya pengadukan mekanis terdiri dari motor, poros pengaduk, dan gayung pengaduk (*impeller*), lihat Gambar 5.3. Pengadukan lambat secara mekanis umumnya memerlukan tiga kompartemen dengan ketentuan G di kompartemen I lebih besar daripada G di kompartemen II dan G di kompartemen III adalah yang paling kecil (Gambar 5.4).



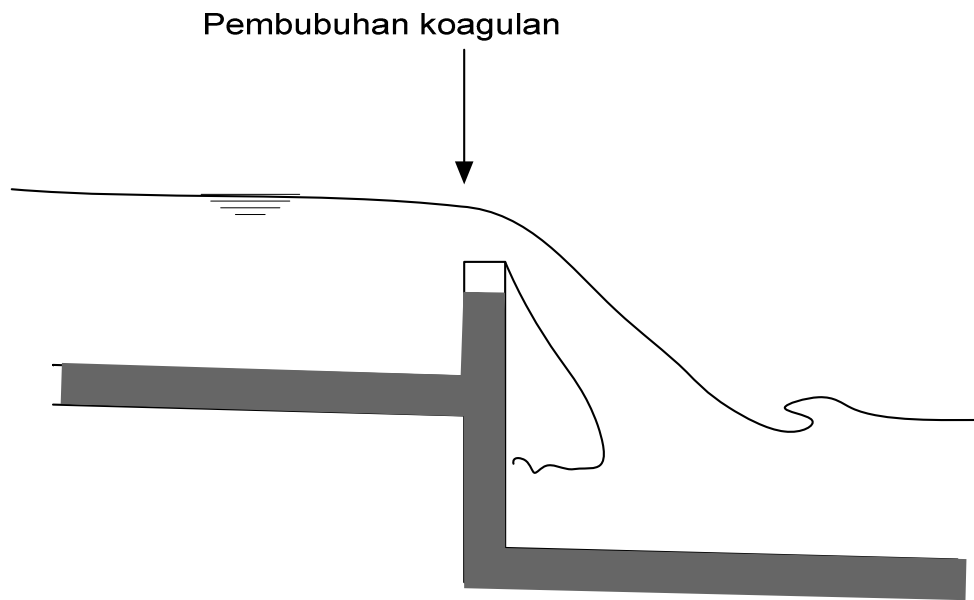
Gambar 5.3 Pengadukan cepat dengan alat pengaduk



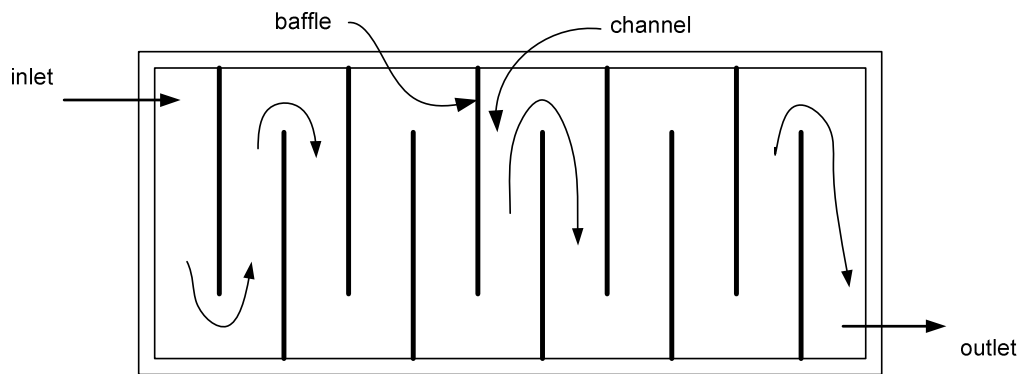
Gambar 5.4 Pengadukan lambat dengan alat pengaduk

Pengadukan hidrolis adalah pengadukan yang memanfaatkan gerakan air sebagai tenaga pengadukan. Sistem pengadukan ini menggunakan energi hidrolik yang dihasilkan dari suatu aliran hidrolik. Energi hidrolik dapat berupa energi gesek, energi potensial (jatuhan) atau adanya lompatan hidrolik dalam suatu aliran. Beberapa contoh pengadukan hidrolis adalah terjunan (Gambar 5.5), loncatan hidrolik, *parshall*

flume, *baffle basin* (*baffle channel*, Gambar 5.6), *perforated wall*, *gravel bed* dan sebagainya.

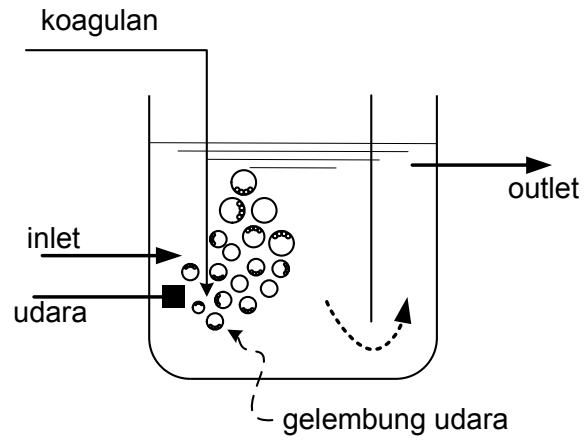


Gambar 5. 5 Pengadukan cepat dengan terjunan



Gambar 5. 6 Denah pengadukan lambat dengan *baffle channel*

Pengadukan pneumatis adalah pengadukan yang menggunakan udara (gas) berbentuk gelembung yang dimasukkan ke dalam air sehingga menimbulkan gerakan pengadukan pada air (Gambar 5.7). Injeksi udara bertekanan ke dalam suatu badan air akan menimbulkan turbulensi, akibat lepasnya gelembung udara ke permukaan air. Makin besar tekanan udara, kecepatan gelembung udara yang dihasilkan makin besar dan diperoleh turbulensi yang makin besar pula.



Gambar 5. 7 Pengadukan cepat secara pneumatis

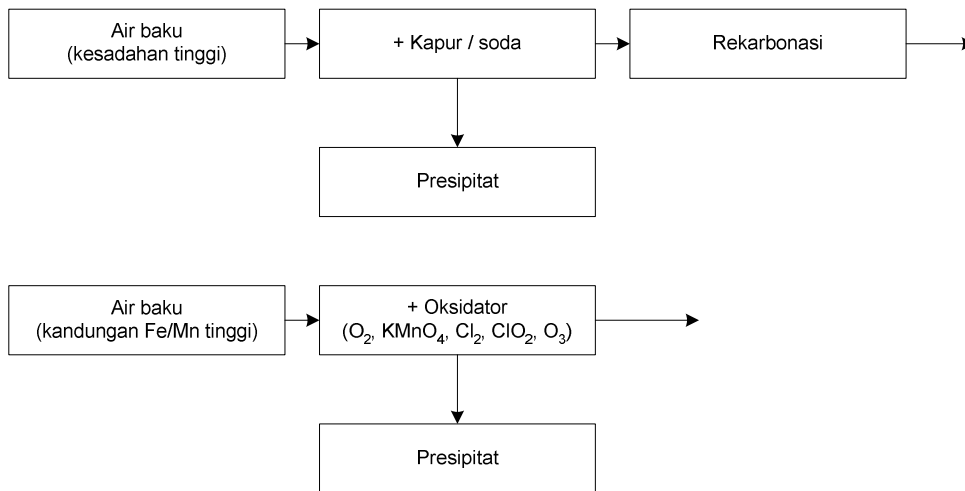
BAB 6

PRESIPITASI KIMIA

RINGKASAN

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa dapat menjelaskan prinsip penyisihan polutan kimiawi dengan cara penambahan bahan kimia sehingga terbentuk presipitat yang mudah diendapkan. Ringkasan bab ini adalah sebagai berikut:

1. Prinsip presipitasi kimia adalah reaksi oksidasi-reduksi yang membutuhkan kondisi lingkungan (pH, waktu, temperatur, konsentrasi) tertentu.
2. Reaksi yang terjadi antara konstituen dalam air dengan bahan kimia yang ditambahkan menghasilkan presipitat (lihat Gambar 6.1) yang mudah diendapkan.



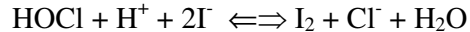
Gambar 6. 1 Alur proses presipitasi

MATERI

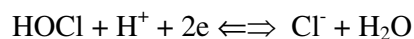
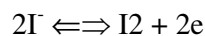
Presipitasi kimiawi dalam pengolahan air minum adalah pengendapan bahan-bahan terlarut dan tersuspensi dalam air dengan penambahan bahan kimia untuk membentuk presipitat. Dalam pengolahan air minum, presipitasi kimia yang paling umum adalah dalam proses koagulasi-flokulasi dengan penambahan koagulan agar terbentuk flok yang mudah diendapkan. Aplikasi lain adalah penyisihan nitrogen atau fosfor, penurunan kesadahan, penyisihan besi dan mangan. Proses kimiawi yang terjadi dalam presipitasi adalah reaksi reduksi-oksidasi (redoks).

Reaksi reduksi dan oksidasi didasarkan pada konsep transfer elektron antar atom, molekul, atau ion. Atom, molekul, atau ion dikatakan mengalami *oksidasi* jika melepaskan elektron dan mengalami *reduksi* apabila menerima elektron.

Proses reaksi reduksi dan oksidasi bisa ditulis secara terpisah sebagai persamaan *reaksi paruh*, misal:



Reaksi ini dapat ditulis dengan dua persamaan:



Reaksi pertama adalah oksidasi karena ion I^- melepaskan 2 elektron sehingga menjadi I_2 . Reaksi yang kedua adalah reduksi karena ion H^+ menerima 2 elektron.

6.1. Penurunan Kesadahan

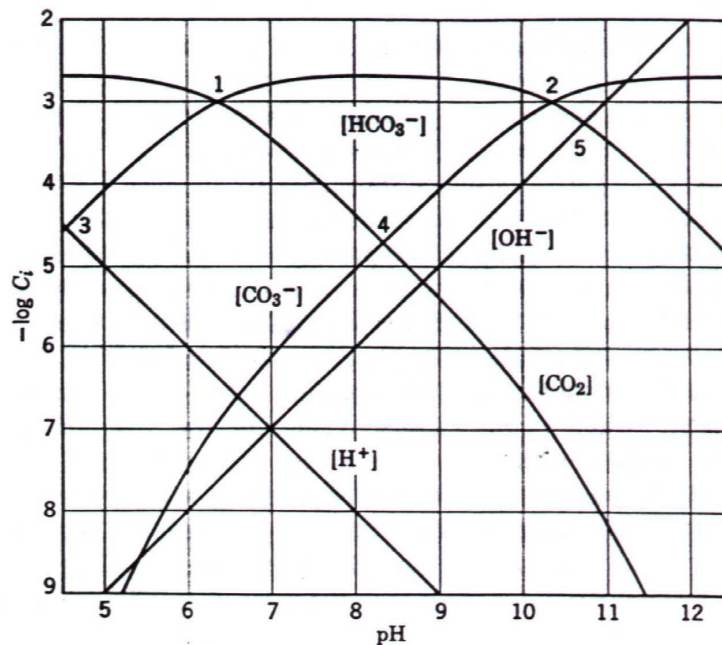
Kesadahan adalah kondisi air yang mengandung ion kalsium dan magnesium yang bereaksi dengan bikarbonat, sulfat, atau klorida. Dalam standar kualitas air minum (Depkes), kesadahan maksimum yang diperbolehkan adalah 500 mg/l (sebagai CaCO_3).

Ada dua macam kesadahan, yaitu **kesadahan sementara** (kesadahan bikarbonat) dan **kesadahan tetap** (kesadahan non-bikarbonat). Kesadahan sementara disebabkan oleh kandungan anion HCO_3^- yang berikatan dengan kalsium dan/atau magnesium. Kesadahan tetap disebabkan oleh kandungan anion SO_4^{2-} dan/atau Cl^- yang berikatan dengan kalsium dan/atau magnesium. Jumlah dari kesadahan sementara dan kesadahan tetap disebut **kesadahan total**.

Ada dua metoda penurunan kesadahan, yaitu:

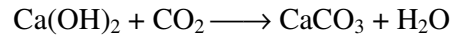
- Pemanasan (khusus untuk kesadahan sementara)
- Presipitasi (untuk kesadahan sementara maupun kesadahan tetap), yaitu dengan penambahan kapur-soda atau dengan soda kaustik

Dalam pelunakan air dengan soda-kapur, Ca^{2+} diendapkan sebagai CaCO_3 dan Mg^{2+} sebagai $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Pengendapan akan terjadi apabila kelarutan CaCO_3 dan $\text{Mg}(\text{OH})_2$ cukup rendah. Kelarutan senyawa-senyawa ini sangat tergantung pada pH (Gambar 6.2).

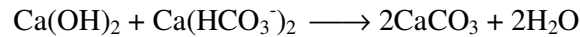


Gambar 6. 2 Pengaruh pH terhadap kesetimbangan sistem karbonat (diambil dari Fair *et al*, 1981)

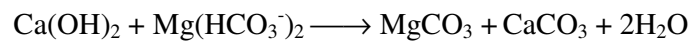
Besarnya kebutuhan soda-kapur tergantung pada alkalinitas. Pada pH air normal, alkalinitas biasanya dalam bentuk ion bikarbonat, HCO_3^- . Bila kapur ditambahkan ke dalam air, akan bereaksi dengan CO_2 :



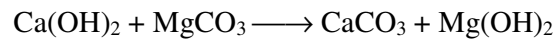
Selanjutnya kapur bereaksi dengan bikarbonat:



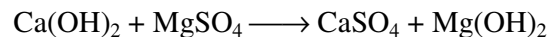
dan



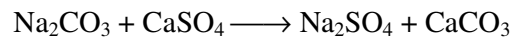
Karena MgCO_3 adalah terlarut, maka kapur yang berlebih akan bereaksi dengan MgCO_3 .



Untuk kesadahan non karbonat, misalnya MgSO_4 , penambahan kapur berlangsung menurut reaksi:

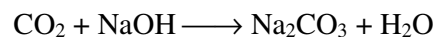


Karena reaksi ini masih mengandung kesadahan non karbonat lain, yaitu CaSO_4 , maka diperlukan penambahan soda.

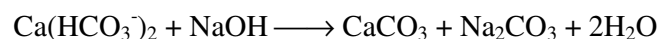


Untuk mengendapkan CaCO_3 diperlukan pH sekitar 9,5 dan untuk mengendapkan Mg(OH)_2 diperlukan pH sekitar 10,8.

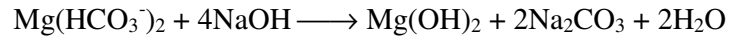
Untuk proses presipitasi menggunakan soda kaustik (NaOH), reaksi yang terjadi adalah:



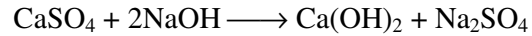
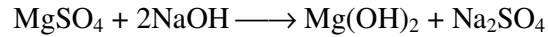
Selanjutnya NaOH bereaksi dengan bikarbonat:



dan



Untuk kesadahan non karbonat, misalnya MgSO_4 atau CaSO_4 , penambahan NaOH berlangsung menurut reaksi:



Besarnya kebutuhan kapur dan/atau soda dapat dihitung dengan prosedur sebagai berikut:

- Periksa kandungan ion-ion Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^{2-} , SO_4^{2-} , dan Cl^- (dalam satuan mg/l).
- Satuan dikonversi menjadi meq/l.

$$a \text{ mg/l [X]} = (a / \text{BE [X]}) \text{ meq/l}$$

$$\text{BE [X]} = \text{BM [X]} / \text{valensi}$$

- Buat diagram konsentrasi berikut:

Kation	Ca^{2+}			Mg^{2+}			dst.					
Anion	HCO_3^{2-}			SO_4^{2-}	Cl^-		dst.					
Total	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$		$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$	MgSO_4	MgCl_2		lain-2					
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11 meq/l

Diagram di atas menunjukkan kesadahan sementara, kesadahan tetap dan kesadahan total dalam satuan meq/l.

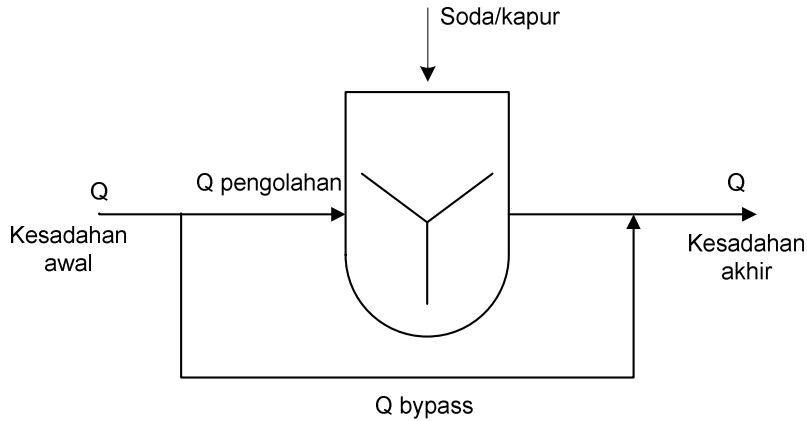
- Satuan meq/l dikonversi menjadi mg/l CaCO_3 :

$$b \text{ meq/l [XY]} = b \times \text{BE CaCO}_3 \text{ mg/l sebagai CaCO}_3.$$

$$\text{BE CaCO}_3 = 50$$

Satuan kesadahan yang lain adalah °D. 1 °D = 17,86 mg/l sebagai CaCO_3 .

- Tentukan debit air yang diolah dan yang di-by pass dengan metoda *split treatment*.



Gambar 6. 3 Split treatment pada penurunan kesadahan

- f. Kebutuhan kapur dan/atau soda dihitung berdasarkan debit pengolahan

Kebutuhan kapur = konsentrasi kapur x debit pengolahan.

Kebutuhan soda = konsentrasi soda x debit pengolahan.

- g. Konsentrasi kapur (dalam mg/l CaO) dihitung dengan rumus:

$$\text{Kapur (mg/l CaO)} = (A + B + C) \times D / E$$

$$A = \text{mg/l CO}_2 \times (56 / 44)$$

$$B = \text{alkalinitas (mg/l CaCO}_3) \times 56 / 100$$

$$C = \text{mg/ Mg} \times 56 / 24,3$$

$$D = \text{kapur berlebih hingga pH 11 (biasanya } 10 - 20\% \times (A+B+C),$$

$$\text{jadi } D = 1,1 \text{ hingga } 1,2$$

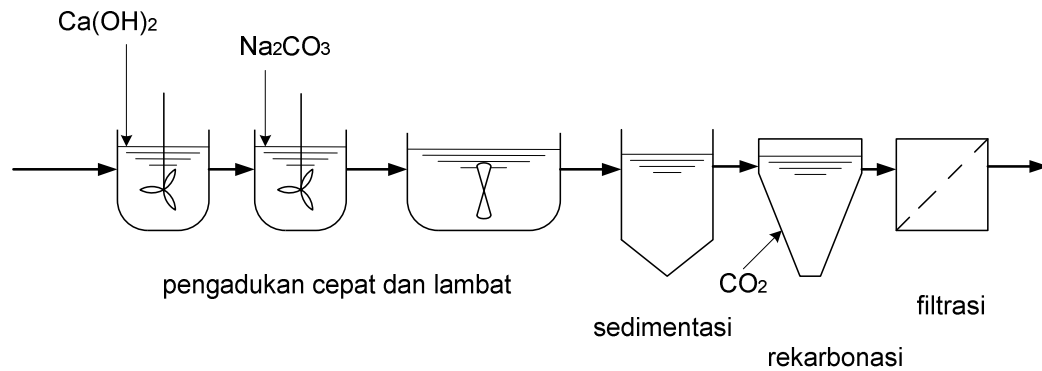
$$E = \text{kadar kemurnian kapur}$$

- h. Konsentrasi soda (dalam mg/l Na₂CO₃) dihitung dengan rumus:

$$\text{Soda ash (mg/l Na}_2\text{CO}_3) = \text{NH} \times 106 / 100$$

$$\text{NH} = \text{kesadahan tetap (mg/l CaCO}_3)$$

Bangunan yang diperlukan untuk proses penurunan kesadahan meliputi bak pengaduk cepat dan lambat, sedimentasi, rekarbonasi, dan filtrasi (lihat diagram alir pada Gambar 6.4).



Gambar 6. 4 Diagram alir proses penurunan kesadahan dengan kapur-soda

6.2. Penyisihan Besi dan Mangan

Besi dan mangan adalah mineral yang umum ditemukan dalam tanah dalam bentuk oksida, yaitu ferri oksida dan mangan oksida. Dalam air, besi dan mangan sering dijumpai berikatan dengan bikarbonat terlarut (ferro bikarbonat dan mangan biakrbonat), ferro terlarut atau mangan sulfat. Konsentrasi besi dalam dalam air tanah biasanya cukup besar, bisa mencapai 25 mg/l. Pada air permukaan, konsentrasi besi biasanya kecil dan berada dalam suspensi partikulat halus Fe_2O_3 ., koloid, atau berbentuk organik kompleks. Konsentrasi mangan di air tanah maupun air permukaan relatif kecil, pada umumnya kurang dari 1 mg/l. Dalam air permukaan, mangan sering berbentuk tetravalent (Mn^{4+}) atau dalam organik kompleks.

Permasalahan keberadaan besi dan mangan dalam air minum adalah:

- Besi dan mangan menyebabkan warna coklat/kuning/hitam pada pakaian, peralatan, perpipaan dan sebagainya.
- Pada perpipaan dan instalasi, besi dan mangan menyebabkan kerak, sehingga terjadi peningkatan headloss.
- Air menjadi berasa dan berbau besi
- Merangsang pertumbuhan bakteri besi dan mangan

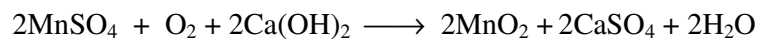
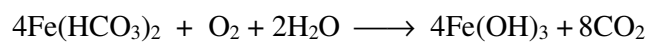
Mengingat beberapa problem di atas, maka ditetapkan standar kualitas air minum untuk parameter besi dan mangan, yaitu konsentrasi besi tidak lebih dari 0,3 mg/l dan mangan tidak lebih dari 0,1 mg/l. Bila konsentrasi besi dan mangan dalam air baku melebihi standar yang telah ditetapkan di atas, maka diperlukan proses pengolahan

untuk menurunkan kadar besi dan mangan tersebut. Salah satu teknik penurunan kadar besi dan mangan adalah oksidasi.

Oksidasi yang digunakan untuk menurunkan kadar besi dan mangan antara lain menggunakan oksigen (disebut aerasi), klor, klor dioksida, kalium permanganat, atau ozone.

6.2.1. Oksidasi dengan Oksigen

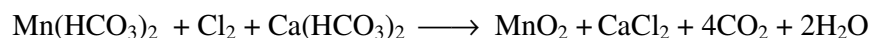
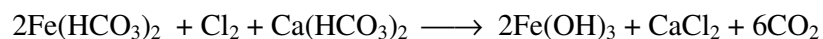
Oksidasi besi dan mangan dengan oksigen berlangsung mengikuti reaksi oksidasi sebagai berikut:



Berdasarkan persamaan reaksi di atas, dapat dihitung kebutuhan oksigen secara teoritis untuk mengoksidasi 1 mg/l besi dan 1 mg/l mangan. Secara teoritis, 1 mg/l oksigen akan mengoksidasi 7 mg/l besi atau 3,4 mg/l mangan. Oksidasi besi berlangsung dengan baik pada pH 7,5 hingga 8 dalam waktu 15 menit. Oksidasi mangan sangat lambat (1 jam) dan tidak efektif pada pH di bawah 9,5.

6.2.2. Oksidasi dengan Klor

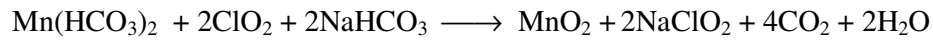
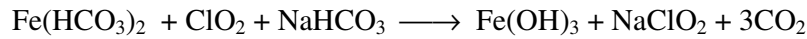
Oksidasi besi dan mangan menggunakan klor berlangsung menurut reaksi sebagai berikut:



Berdasarkan reaksi di atas, diperoleh kebutuhan klor secara teoritis, yaitu 1 mg/l klor dapat mengoksidasi 1,58 mg/l besi atau 0,78 mg/l mangan. Kecepatan reaksi oksidasi tergantung pada pH. Oksidasi besi dan mangan berlangsung baik pada pH 8 - 8,3. Oksidasi besi membutuhkan waktu 15 - 30 menit dan oksidasi mangan membutuhkan waktu 2 - 3 jam. Oksidasi dengan klor mempunyai kecepatan lebih besar daripada aerasi dan mampu mengoksidasi besi yang berikatan organik.

6.2.3. Oksidasi dengan Klor Dioksida

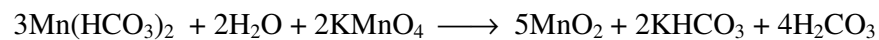
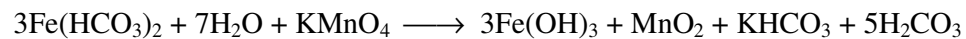
Klor dioksida adalah oksidator kuat yang efektif mengoksidasi besi dan mangan kompleks. pH merupakan faktor penting untuk berlangsungnya reaksi ini. pH yang diperlukan adalah minimum 7,0.



Secara teoritis, 1 mg/l klor dioksida mampu mengoksidasi 0,83 mg/l besi atau 0,41 mg/l mangan.

6.2.4. Oksidasi dengan Kalium Permanganat

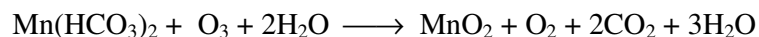
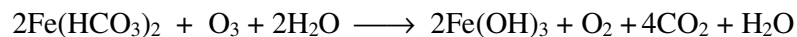
Kalium permanganat adalah oksidator kuat. Waktu reaksi cepat dalam rentang pH yang luas. Waktu oksidasi 5 - 10 menit pada pH di atas 7,0.



Dari reaksi ini, diperoleh hasil secara teoritis, bahwa 1 mg/l KMnO_4 dapat mengoksidasi 1,06 mg/l besi atau 0,52 mg/l mangan.

6.2.5. Oksidasi dengan Ozone

Reaksi oksidasi besi dan mangan menggunakan ozone berlangsung sebagai berikut:



Hasil perhitungan secara teoritis, untuk mengoksidasi 2,3 mg/l besi atau 1,5 mg/l mangan diperlukan 1 mg/l ozone.

Besarnya kebutuhan oksidator yang digunakan untuk menurunkan kadar besi dan mangan dapat dihitung dengan prosedur sebagai berikut:

- a. Hitung kadar besi dan/atau mangan (dalam mg/l) yang harus diturunkan.

- b. Hitung kebutuhan oksidator (dalam mg/l) sesuai dengan perhitungan teoritis atau stoikiometris.
- c. Kebutuhan oksidator (dalam kg/hari) dihitung dengan rumus:

$$\text{Kg/hari oksidator} = \frac{(\text{Debit pengolahan} \times \text{mg/l oksidator})}{\% \text{ kadar oksidator}} \times \text{faktor konversi}$$

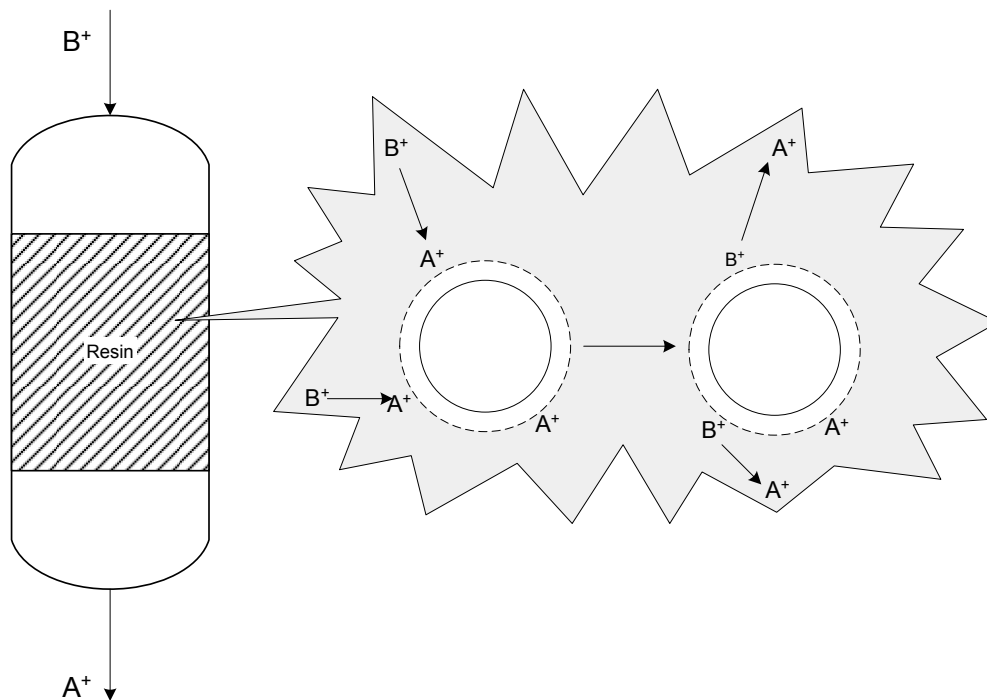
BAB 7

PERTUKARAN ION

RINGKASAN

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa dapat menjelaskan prinsip proses pertukaran ion (Gambar 7.1) dan aplikasinya dalam pengolahan air minum. Ringkasan bab ini adalah sebagai berikut:

1. Prinsip pertukaran ion adalah selektifitas, artinya ion yang mempunyai koefisien selektifitas besar mampu menggantikan ion lain di resin yang koefisien selektifitasnya lebih kecil.
2. Empat tahap pengoperasian penukar ion: (1) service, (b) backwash, (c) regenerasi, (d) pembilasan.



Gambar 7. 1 Proses pertukaran ion

MATERI

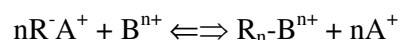
7.1. Teori Pertukaran Ion

Proses pertukaran ion melibatkan reaksi kimia antara ion dalam fase cair dan ion dalam fase padat. Dalam aplikasi pengolahan air, ion dalam fase cair merupakan ion yang terkandung dalam air baku dan ion dalam fase padat merupakan ion yang terdapat dalam resin, baik resin alami maupun resin sintetis.

Beberapa aplikasi yang umum dalam pengolahan air bersih antara lain:

- Penurunan kesadahan, yaitu dengan mempertukarkan ion natrium dalam resin dengan ion kalsium dan/atau magnesium dalam air.
- Demineralisasi total, yaitu mempertukarkan ion dalam resin dengan semua kation dan anion dalam air. Dalam demineralisasi total ini, resin kationik mengandung ion hidrogen dan resin anionik mengandung ion hidroksil. Jadi air yang terolah hanya mengandung ion hidrogen dan hidroksil, yang akan membentuk air murni.
- Demineralisasi parsial pada penyediaan air bersih dengan air baku air laut.

Pertukaran ion dalam reaksi kimia dapat ditulis:



di mana R^- adalah gugus anionik yang melekat pada resin pertukaran ion, dan A^+ dan B^{n+} adalah ion di larutan.

Dari reaksi itu dapat ditulis konstanta kesetimbangan sebagai berikut:

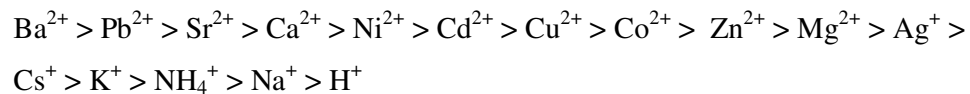
$$K_{A^+}^{B^{n+}} = \frac{[R_n^-B^{n+}][A^+]^n}{[R^-A^+]^n[B^{n+}]} \quad (7.1)$$

K_A^{+B} merupakan koefisien selektifitas atau konstanta aksi massa. Besarnya K_A^{+B} menyatakan besarnya preferensi relatif untuk pertukaran ion, artinya kecenderungan resin untuk mengikat ion B dibandingkan dengan ion A. Koefisien selektifitas yang

lebih besar berarti mempunyai preferensi yang lebih besar terhadap ion di resin. Sebuah penukar ion cenderung untuk memilih:

1. ion yang valensinya lebih besar
2. ion dengan volume terlarut lebih kecil
3. ion dengan kemampuan polarisasi lebih besar
4. ion yang bereaksi kuat dengan *site* pertukaran ion dari resin
5. ion yang kurang terlibat dengan ion lain untuk membentuk kompleks

Atas dasar itu, maka preferensi beberapa kation dapat disusun sebagai berikut (Reynold, 1996):



Seri ini adalah untuk resin asam kuat - yang mempunyai *site* reaktif kuat seperti gugus sulfonat (-SO₃H). Resin asam lemah - yang mempunyai *site* reaktif lemah seperti gugus karboksilat (-COOH) - akan memposisikan H⁺ ke kiri. Untuk *site* yang sangat lemah, posisi H⁺ bisa ke kiri sampai pada posisi Ag⁺.

Untuk beberapa anion, preferensinya sebagai berikut (Reynold, 1996):



Seri ini adalah untuk resin basa kuat - yang mempunyai *site* reaktif kuat seperti gugus ammonium kuarter. Untuk resin basa lemah - yang mempunyai *site* reaktif lemah seperti gugus amina sekunder atau tersier akan memposisikan OH⁻ ke kiri.

Beberapa nilai koefisien selektifitas dapat dilihat pada Tabel 7.1 dan 7.2. Nilai yang tertera pada tabel tersebut merupakan rasio terhadap H⁺ (untuk kation) dan OH⁻ (untuk anion). Koefisien selektifitas kation Bⁿ⁺ terhadap kation A⁺ dapat ditulis:

$$K_{A^+}^{B^{n+}} = \frac{K_{H^+}^{B^{n+}}}{K_{H^+}^{A^+}} \quad (7.2)$$

Tabel 7.1 Koefisien Selektifitas Relatif beberapa Kation

$K_{H^+}^{Na^+}$	1,5
$K_{H^+}^{K^+}, K_{H^+}^{NH_4^+}$	2,5
$K_{Na^+}^{K^+}$	1,7
$K_{Li^+}^{Na^+}$	2,0
$K_{Na^+}^{Ca^{2+}}$	3 sp 6
$K_{Na^+}^{Mg^{2+}}$	1,0 sp 1,5

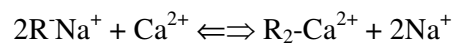
Tabel 7.2 Koefisien Selektifitas Relatif beberapa Anion

$K_{ClH^-}^{NO_3^-}$	4
$K_{Cl^-}^{Br^-}$	3
$K_{Cl^-}^{F^-}$	0,1
$K_{Cl^-}^{HCO_3^-}$	0,5
$K_{Cl^-}^{CN^-}$	1,5
$K_{Cl^-}^{SO_4^{2-}}$	0,15
$K_{Cl^-}^{HSO_4^-}$	1,6
$K_{NO_3^-}^{SO_4^{2-}}$	0,04
$K_{OH^-}^{Cl^-}$	Tipe I : 15 - 20 Tipe II : 1,5

Tipe I : Gugus reaktif : $-CH_2N : (CH_3)_3$

Tipe II : Gugus reaktif : $-CH_2N : (CH_3)_2C_2H_4OH$

Untuk lebih jelasnya dicontohkan reaksi berikut:



$$K_{Na^+}^{Ca^{2+}} = \frac{[R_2^-Ca^{2+}][Na^+]^2}{[R^-Na^+]^2[Ca^{2+}]} \quad (7.3)$$

$$K_{Na^+}^{Ca^{2+}} = \frac{K_{H^+}^{Ca^{2+}}}{K_{H^+}^{Na^+}} \quad (7.4)$$

Koefisien selektifitas juga dapat dinyatakan dalam fraksi ekuivalen. Untuk mengkonversi satuan konsentrasi ke fraksi ekuivalen adalah sebagai berikut:

- a. C = konsentrasi anion atau kation total dalam larutan (eq/l)
- b. $X_{A^+} = \frac{[A^+]_s}{C}$, di mana X_A adalah fraksi ekuivalen ion A dalam larutan
- c. $X_{B^+} = \frac{[B^+]_s}{C}$, di mana X_B adalah fraksi ekuivalen ion B dalam larutan
- d. $X_A + X_B = 1$
- e. $\bar{X}_{A^+} = \frac{[R^- A^+]_R}{C}$, di mana \bar{X}_{A^+} adalah fraksi ekuivalen ion A dalam resin dan C adalah konsentrasi ion total di resin
- f. $\bar{X}_{B^+} = \frac{[R^- B^+]_R}{C}$, di mana \bar{X}_{B^+} adalah fraksi ekuivalen ion B dalam resin
- g. $\bar{X}_{A^+} + \bar{X}_{B^+} = 1$

Dengan substitusi beberapa persamaan di atas dengan persamaan (7.2) diperoleh:

$$K_{A^+}^{B^{n+}} = \frac{[\bar{C} \bar{X}_{B^+}][CX_{A^+}]}{[\bar{C} \bar{X}_{A^+}][CX_{B^+}]} \quad (7.5)$$

$$K_{A^+}^{B^{n+}} = \frac{\bar{X}_{B^+} X_{A^+}}{X_{A^+} X_{B^+}} \quad (7.6)$$

$$K_{A^+}^{B^{n+}} = \frac{(1 - X_{B^+}) \bar{X}_{B^+}}{(1 - \bar{X}_{B^+}) X_{B^+}} \quad (7.7)$$

Kecepatan pertukaran ion tergantung pada kecepatan beberapa mekanisme transpor yang terlibat dan kecepatan reaksi pertukaran sendiri, yaitu:

1. pergerakan ion dari larutan ke film atau lapisan batas sekitar resin

2. difusi ion melewati film ke permukaan resin
3. difusi ion menembus pori solid ke *site* pertukaran
4. pertukaran ion oleh reaksi
5. difusi ion tertukar keluar dari pori ke permukaan solid
6. difusi ion tertukar melewati film cairan atau lapisan batas sekitar solid
7. pergerakan ion tertukar ke dalam larutan

7.2. Tipe dan Karakteristik Resin

Berdasarkan muatan ion yang dapat dipertukarkan, resin pertukaran ion dapat dikelompokkan menjadi (Benefield, 1982):

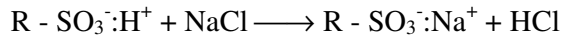
1. Resin pertukaran kation (mengandung kation yang dapat dipertukarkan)
 - a. Resin pertukaran asam kuat
 - b. Resin pertukaran asam lemah
2. Resin pertukaran anion (mengandung anion yang dapat dipertukarkan)
 - a. Resin pertukaran basa kuat
 - b. Resin pertukaran basa lemah

Resin pertukaran asam kuat mengandung gugus fungsional yang diturunkan dari asam kuat (biasanya asam sulfat). Resin pertukaran asam lemah mengandung gugus fungsional yang diturunkan dari asam lemah (umumnya bentuk karboksilat atau fenolat).

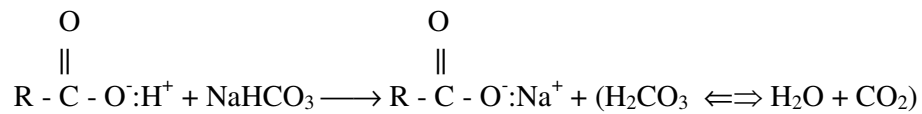
Resin pertukaran basa kuat mengandung gugus fungsional yang berasal dari gugus ammonium kuarter tipe I dan II, sedangkan resin pertukaran basa lemah mengandung amina primer, sekunder dan/atau tersier sebagai gugus fungsional.

Sebagai contoh reaksi pertukaran tiap tipe resin digambarkan sebagai berikut:

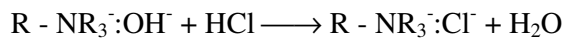
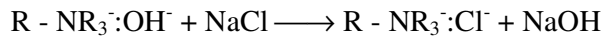
1. Resin pertukaran asam kuat



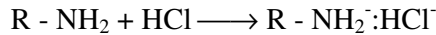
2. Resin pertukaran asam lemah



3. Resin pertukaran basa kuat



4. Resin pertukaran basa lemah



Karakteristik resin sebagai media pertukaran ion harus mempunyai ion yang dapat dipertukarkan dengan struktur yang tidak larut dalam air dan tersedia ruang yang cukup di porinya agar ion bebas keluar masuk.

Dalam merancang sistem pertukaran ion atau memilih resin, kapasitas resin adalah hal yang penting karena berpengaruh pada efisiensi proses dan biaya. Kapasitas resin biasanya dinyatakan sebagai kapasitas total atau kapasitas operasi. Kapasitas total menyatakan jumlah ion total yang secara teoritis dapat dipertukarkan per satuan massa atau volume resin (misal: meq/l, meq/g).

Kapasitas operasi menyatakan kapasitas pemakaian resin aktual untuk menukar ion dari larutan melalui partikel resin pada kondisi tertentu. Kapasitas operasi resin tergantung pada debit air melewati kolom, kedalaman bed, koefisien selektifitas, ukuran ion, jumlah regenerasi yang digunakan, komposisi dan konsentrasi bahan terlarut, temperatur, dan kualitas air yang dikehendaki. Kapasitas operasi dari suatu resin dalam kolom pertukaran ion sampai tercapai kurva *breakthrough* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$X = \frac{C_o V_{op}}{V_r} - \frac{C_{op}}{V_r} \sum_{i=1}^n (Y_i V_i) \quad (7.8)$$

di mana:

X = kapasitas operasi (meq/ml)

C_o = konsentrasi ion di influen (mg/l)

Y_i = nilai C_e/C_o pada titik tengah interval V yang sesuai

V_i = volume efluen pada interval tertentu $[(V)_{i+1} - V_i]$, liter

C_e = konsentrasi ion di influen (mg/l)

V_{op} = volume *throughput* jika operasi dihentikan (liter)

V_r = volume resin di kolom (ml)

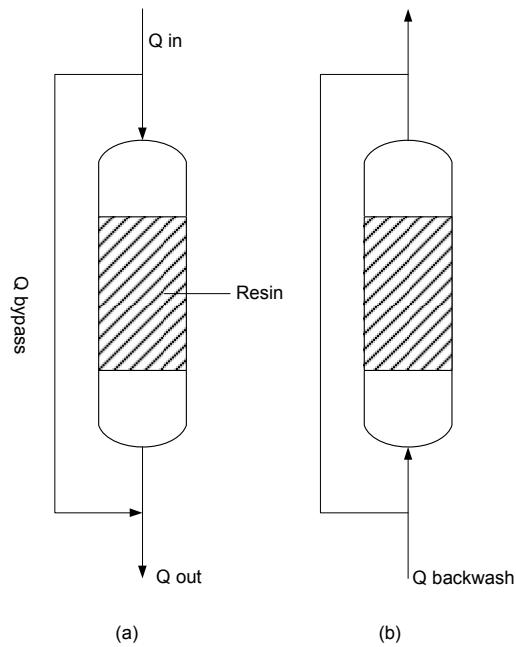
Kapasitas operasi adalah nilai kapasitas yang digunakan untuk merancang kolom pertukaran ion.

7.3. Pengoperasian

Sistem pertukaran ion dapat dioperasikan dalam salah satu model berikut: *batch*, *fixed-bed*, *fluidized-bed*, dan *continuous*. Sistem *fixed-bed* merupakan sistem yang paling umum (Gambar 7.2). Daur operasinya meliputi empat tahap: service, back-wash, regenerasi dan pembilasan.

a. Service

Reaksi pertukaran terjadi selama tahap *service*. Tahap ini dikarakterisasi dengan kurva konsentrasi efluen atau kurva breakthrough. Dalam prakteknya, kecepatan aliran cukup berarti dan kesetimbangan tidak pernah tercapai secara total dalam kolom. Dalam kondisi demikian terdapat batas yang memisahkan resin yang mengandung ion yang ditukarkan dengan resin yang mengandung ion yang menukarkan, yang membentuk “kurva-S”. Batas ini bergerak dari bagian atas menuju ke bawah.



Gambar 7. 2 Kolom pertukaran ion: (a) tahap operasi, (b) backwash

b. Backwash

Backwash dengan air produk dilakukan setelah kapasitas operasi penukar ion tercapai. Proses *upflow* digunakan untuk mempersiapkan resin yang akan diregenerasi. Back-wash mempunyai tujuan:

- Memecah "gumpalan" resin
- Menghilangkan bahan yang terperangkap dalam resin dengan filtrasi
- Mengeliminasi gas
- Me-stratifikasi ulang resin

c. Regenerasi

Regenerasi menggantikan ion tertukar selama service berlangsung dan mengembalikan resin ke kapasitas pertukarannya semula, yang tergantung pada jumlah regeneran yang digunakan. Pada umumnya asam-asam mineral digunakan untuk meregenerasi resin kation, dan alkali digunakan untuk meregenerasi resin anion.

Efisiensi regenerasi didefinisikan sebagai rasio ekivalen total ion yang disisihkan dari resin dengan ekivalen total ion dalam volume regeneran yang digunakan.

d. Pembilasan

Setelah tahap regenerasi, resin pertukaran ion harus dicuci untuk membebaskan regeneran berlebih sebelum dioperasikan kembali. Prosedur pencucian meliputi dua tahap menggunakan air produk. Pencucian lambat menggantikan regeneran, dan limbah dari pencucian ini digabungkan dengan regeneran bekas untuk dibuang. Pencucian cepat membersihkan ion berlebih, dan buangan dari pencucian itu dikumpulkan dan digunakan untuk air pengencer regeneran.

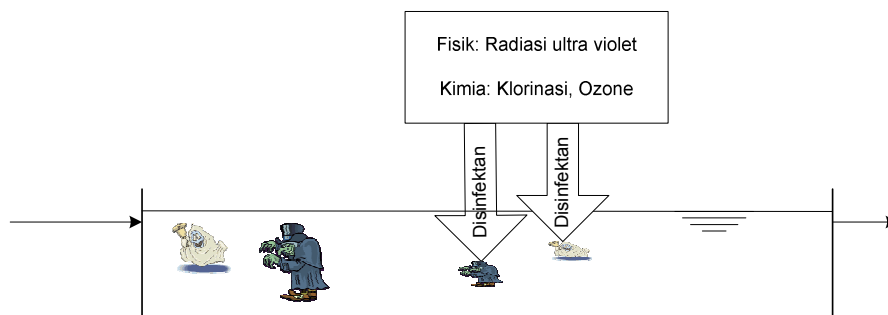
BAB 8

DISINFEKSI

RINGKASAN

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa dapat menjelaskan prinsip disinfeksi dengan berbagai metoda untuk mendapatkan air yang memenuhi persyaratan mikrobiologis. Ringkasan bab ini adalah sebagai berikut:

1. Mekanisme disinfeksi dengan radiasi ultra violet adalah penetrasi sinar menembus dinding sel dan terjadi gangguan pada replikasi sel. Oleh karena itu, sinar UV harus mengenai langsung pada mikroorganisme (tidak ada halangan).
2. Disinfeksi dengan senyawa klor memerlukan residu untuk bisa berfungsi membunuh mikroorganisme, namun residu ini yang menimbulkan produk samping bila dalam air terdapat bahan organik alami.
3. Ozone sangat cepat mematikan bakteri, virus, dan spora, namun diperlukan biaya yang besar karena harus diproduksi di tempat instalasi dengan energi listrik yang tinggi.



Gambar 8. 1 Ilustrasi proses disinfeksi

MATERI

Salah satu persyaratan kualitas air minum adalah persyaratan mikrobiologis, yaitu air harus bebas dari mikroorganisme patogen. Disinfeksi merupakan proses untuk membebaskan air minum dari mikroorganisme patogen tersebut.

Metoda disinfeksi, secara umum ada dua, yaitu cara fisik dan cara kimiawi. Disinfeksi secara fisik adalah perlakuan fisik terhadap mikroorganisme, yaitu panas dan cahaya yang mengakibatkan matinya mikroorganisme akibat perlakuan fisik tersebut. Air panas hingga titik didihnya akan merusak sebagian besar bakteri. Sinar matahari mempunyai sinar ultra violet yang cukup berperan dalam mematikan mikroorganisme.

Disinfeksi secara kimiawi adalah memberikan bahan kimia ke dalam air sehingga terjadi kontak antara bahan tersebut dengan mikroorganisme yang berakibat matinya mikroorganisme. Beberapa bahan kimia untuk disinfeksi yang umum adalah klor dan senyawanya, brom, iodine, ozone, fenol dan senyawa fenolat, alkohol, logam berat dan senyawa yang berkaitan, bahan pewarna, sabun dan deterjen sintesis, senyawa ammonium kuartar, hidrogen peroksida dan beberapa basa dan asam. Dari bahan-bahan kimia di atas, klor dan ozone yang paling umum digunakan dalam disinfeksi air minum.

8.1. Radiasi Ultra Violet

Radiasi sinar ultra violet dapat digunakan untuk disinfeksi air minum. Sumber sinar ultra violet yang bisa digunakan adalah lampu mercury tekanan rendah. Lampu mercury menghasilkan sekitar 85% output cahaya monokrom pada panjang gelombang 253,7 nm, yang berada pada rentang optimum (250 - 270 nm) untuk mematikan mikroorganisme. Untuk menghasilkan energi ultra violet, lampu mengandung uap mercury. Energi dibangkitkan dengan eksitasi uap mercury menghasilkan emisi sinar ultra violet.

Radiasi ultra violet dengan panjang gelombang sekitar 254 nm menembus dinding sel mikroorganisme dan diabsorpsi oleh bahan seluler termasuk DNA

(deoxyribonucleic acid) dan RNA (ribonucleic acid), sehingga menghalangi replikasi atau menyebabkan kematian sel.

Efektifitas radiasi adalah fungsi langsung dari kuantitas energi atau dosis yang diabsorpsi mikroorganisme. Penon-aktifan bakteri yang idelan akibat sinar ultra violet dapat didekati dengan rumus orde sat berikut:

$$\ln \frac{N_t}{N_o} = -kIt \quad (8.1)$$

dengan:

N_t = densitas bakteri yang tersisa setelah disinari UV, jumlah organisme per unit volume air (organisme/cm³ atau organisme/100 ml)

N_o = densitas bakteri sebelum disinari UV, jumlah organisme per unit volume air (organisme/cm³ atau organisme/100 ml)

k = konstanta kecepatan penon-aktifan, luas paparan air per unit input energi per detik atau per menit (cm²/μW.det atau cm²/μW.menit)

I = intensitas input energi ultra violet, input energi per unit luas air, μW/cm²

t = waktu pemaparan, detik atau menit

Rumus ini mewakili kondisi ideal. Dalam praktek, deviasi dari model yang ideal dapat terjadi karena ada banyak faktor yang berpengaruh terhadap efektifitas dari penon-aktifan bakteri dengan radiasi sinar ultra violet. Keuntungan dan kerugian dari radiasi ultra violet sebagai disinfektan dapat dilihat pada pada Tabel 8.1.

Tabel 8.1 Keuntungan dan Kerugian Radiasi Ultraviolet sebagai Disinfektan

Keuntungan	Kerugian
<ol style="list-style-type: none"> 1. Tidak ada zat kimia yang dilarutkan dalam air sehingga kualitas air tidak terpengaruh. 2. Konstituen di air, seperti ammonia tidak menimbulkan efek pada kapasitas disinfeksi 3. Tidak menimbulkan rasa dan bau (tetapi UV tidak menghilangkan rasa, bau dan warna) 4. Waktu pemaparan yang singkat 5. Overdosis tidak menyebabkan efek mengganggu 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Spora, kista dan virus lebih susah didesinfeksi daripada bakteri 2. Membutuhkan banyak UV karena diserap zat lain 3. Tidak ada residu, sehingga diperlukan disinfektan sekunder 4. Peralatan yang mahal dan energi listrik yang dibutuhkan besar 5. Seringkali, perawatan alat yang mahal diperlukan untuk memastikan energi yang stabil dan densitas yang relatif seragam

Sumber: Qasim, *et al.* (2000)

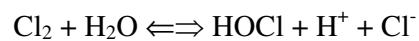
8.2. Klorinasi

Klor merupakan bahan yang paling umum digunakan sebagai disinfektan karena efektif pada konsentrasi rendah, murah dan membentuk sisa klor jika diterapkan pada dosis yang mencukupi. Beberapa faktor penting yang mempengaruhi efisiensi disinfeksi dengan klor adalah:

- Kekuatan dari disinfektan
- Konsentrasi dari disinfektan
- Temperatur
- Pengadukan
- Reaksi *breakpoint*
- Waktu kontak
- Karakteristik air
- Karakteristik mikroorganisme
- pH

Senyawa klor yang umum digunakan adalah gas klor (Cl_2), kalsium hipoklorit ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$), sodium hipoklorit (NaOCl) dan klor dioksida (ClO_2).

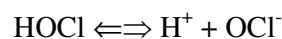
Gas klor. Klor dalam bentuk gas bila dimasukkan ke dalam air akan berlangsung reaksi:



Konstanta stabilitas untuk reaksi ini adalah:

$$K = \frac{[\text{HOCl}][\text{H}^+][\text{Cl}^-]}{\text{Cl}_2} \cong 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ pada } 25^\circ\text{C} \quad (8.2)$$

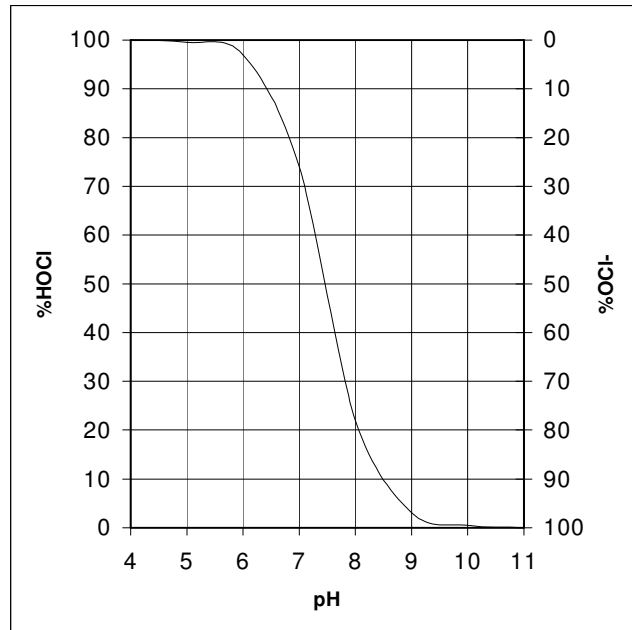
Karena besarnya koefisien ini, jumlah klor yang besar dapat terlarut dalam air. Ionisasi yang akan terjadi adalah:



Konstanta ionisasi untuk reaksi ini adalah:

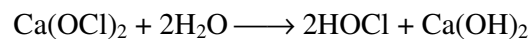
$$K_i = \frac{[H^+][OCl^-]}{[HOCl]} \cong 2,9 \cdot 10^{-8} \text{ pada } 25^\circ\text{C} \quad (8.3)$$

Jumlah HOCl dan OCl⁻ yang ada dalam air disebut *klor tersedia bebas*. Distribusi relatif dari dua spesies ini (HOCl dan OCl⁻) sangat penting karena efisiensi pembunuhan HOCl sekitar 40 - 80 kali dari OCl⁻ dan keberadaannya tergantung pada pH air (Gambar 8.2)

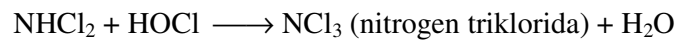
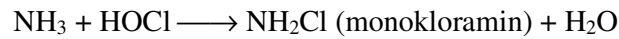


Gambar 8. 2 Pengaruh pH pada distribusi asam hipoklor dan ion hipoklorit pada temperatur 20°C (diambil dari Sawyer, 1994)

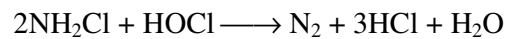
Garam hipoklor. Kalsium hipoklorit atau sodium hipoklorit yang digunakan sebagai disinfektan akan berlangsung reaksi berikut:



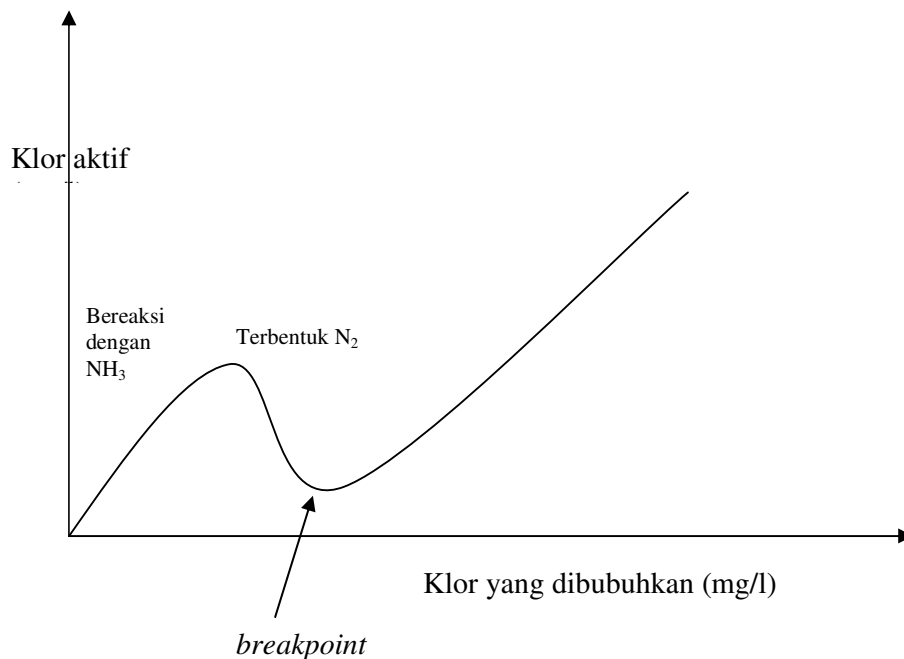
Asam hipoklor, sebagai hasil reaksi gas klor atau garam hipoklor, merupakan bahan pengoksidasi yang sangat aktif. Karena itu mula-mula bahan ini akan bereaksi dengan ammonia yang sering terdapat dalam air dan air limbah dan membentuk tiga tipe kloramin sebagai berikut:



Reaksi-reaksi ini sangat tergantung pada pH, temperatur, waktu kontak, dan rasio klor terhadap ammonia. Klor dalam senyawa-senyawa ini disebut *klor tersedia tergabung*. Senyawa klor ini kurang efisien dalam membunuh bakteri. Karena itu dosis klor ditambah hingga terdapat sisa klor, yaitu klor tersedia bebas yang efisien sebagai disinfektan. Penambahan dosis klor berakibat monokloramin pecah hingga terbentuk gas N_2 .



Reaksi ini tidak menghasilkan klor aktif, sehingga kadar klor aktif di air menurun sampai titik terendah yang disebut *breakpoint* (lihat Gambar 8.3).



Gambar 8.3 Grafik klorinasi dengan *breakpoint*
(diambil dari Alaerts, 1987)

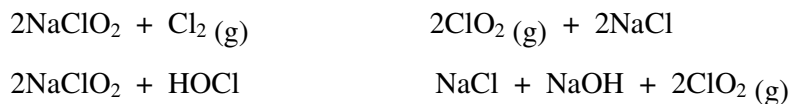
Klor Dioksida. Penggunaan klor dioksida sebagai disinfektan kurang populer dibandingkan dengan gas klor atau garam hipklor. Pada Tabel 8.2 diberikan uraian tentang keuntungan dan kerugian klor dioksida sebagai disinfektan dalam pengolahan air

Tabel 8.2 Keuntungan dan kerugian klor dioksida sebagai disinfektan

Keuntungan	Kerugian
1. Mampu mematikan bakteri dan virus dengan kuat	1. Biaya bahan kimia besar (kira-kira 5 kali dari gas klor)
2. Tidak bereaksi dengan amonia	2. Harus diproduksi di lokasi instalasi
3. Tidak bereaksi dengan bahan organik untuk membentuk THMs	3. Kemungkinan ada resiko kesehatan dari hasil sampingan pembuatan klor dioksida
4. Reaksinya dapat merusak 30 - 40% precursors THM	4. Menimbulkan rasa logam pada air produk pada dosis yang tinggi
5. Efisiensi desinfeksi relatif tidak terpengaruh pH antara 6 dan 10	5. Kurang handal dan praktis untuk evaluasi dan diferensiasi klor dioksida dari senyawa klor lain

Sumber: Qasim *et al.* (2000)

Untuk aplikasi disinfeksi pada pengolahan air minum, klor dioksida diperoleh dari larutan natrium chlorit (NaClO_2) dengan mereaksikan larutan natrium klorit dengan gas klor atau dengan asam hipoklorit. Reaksinya dapat dilihat pada persamaan reaksi:



Hal penting yang harus diperhatikan dalam memproduksi klor dioksida adalah:

- Jika ditambahkan larutan klor berlebih, klor bebas dapat mengoksidasi klor dioksida membentuk ion klorat (ClO_3^-), yang sulit dihilangkan dari larutan.
- Klor dioksida yang ditambahkan ke dalam air diubah menjadi ion klorite (ClO_2^-), yang bila bersama-sama dengan ion klorat dapat menimbulkan efek kesehatan yang tidak diinginkan.
- Kelebihan klor dalam klor dioksida akan menghasilkan THMs.

Dosis Klor dan Sisa Klor. Dosis klor adalah jumlah klor yang ditambahkan pada air untuk menghasilkan residu spesifik pada akhir waktu kontak. Hasil sisa (residu)

adalah dosis dikurangi kebutuhan klor yang digunakan oleh komponen dan materi organik yang ada dalam air. Dosis klor yang dibutuhkan pada proses pengolahan ditentukan dengan uji laboratorium atau *pilot plant*.

Dosis klor dapat bervariasi tergantung pada kualitas air, temperatur dan kondisi iklim yang lain. Umumnya, dosisnya berada pada rentang 0,2 sampai 4 mg/L. Tabel 8.3 menunjukkan dosis klor yang dianjurkan.

Tabel 8.3 Dosis Klor yang Diperlukan untuk Disinfeksi

Tujuan Pengolahan	Dosis klor, mg/L	Waktu kontak, menit	Rentang pH
Residu klor kombinasi	1-5	a	7-8
Residu klor bebas	0,5-4	a	7-8
Reaksi breakpoint	6-8 x NH ₃ ^b	30	6,5-8,5 (optimum 7,5)
Pembentukan monokloramin (dikloramin akan terbentuk bila pH di bawah 7)	3-4 x NH ₃ ^b	20	7-8
Pembentukan residu klor bebas	6-8 x NH ₃ ^b	20	6,5-8,5

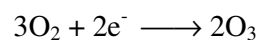
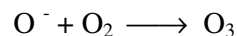
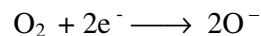
a. Jika dibutuhkan untuk CT

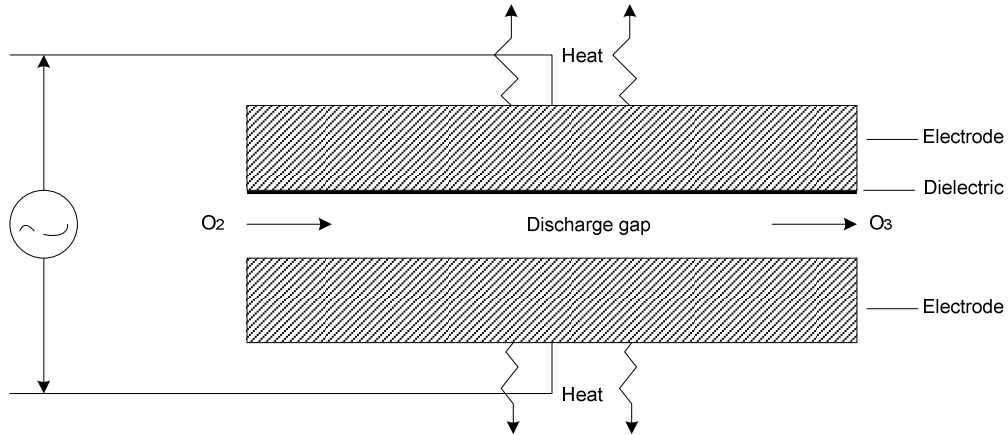
b. Dinyatakan dalam mg/L sebagai NH₃

Sumber: Qasim *et al.* (2000)

8.3. Disinfeksi dengan Ozone

Ozone merupakan oksidan kuat berbentuk gas berwarna biru yang berbau tajam dan merupakan bentuk tidak stabil dari oksigen yang terdiri dari tiga atom O (rumus kimia ozone adalah O₃). Ozone dihasilkan dari oksigen yang dilewatkan pada listrik bertegangan tinggi dalam udara kering (Gambar 8.4). Reaksinya adalah:





Gambar 8. 4 Skema sel pembentukan ozone

Reaksi ini merupakan reaksi *reversible*, sekali ozon terbentuk, akan terurai menjadi oksigen. Reaksi *reversible* ini terjadi di atas suhu 35°C . Oleh karena itu, diperlukan peralatan sistem pendingin pada sistem penghasil ozon. Energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan ozon adalah 0,82 kW-h per kg ozon.

Pemakaian ozon dalam pengolahan air minum yang paling umum adalah untuk disinfeksi terhadap bakteri dan virus. Dosis ozon sebesar 0.4 mg/l dalam waktu 4 menit (faktor waktu kontak (CT) = 1.6) direkomendasikan untuk menghilangkan bakteri patogenik dan polivirus. Faktor CT sebesar 2 diperlukan untuk menjamin penghilangan total *Giardia cysts*.

Disinfeksi dengan ozon membutuhkan air input yang bebas dari mangan terlarut (Mn^{2+}). Jika terdapat kandungan Mn^{2+} lebih besar dari 0,03 mg/l, ozon akan mengoksidasi mangan menjadi Mn(VII) yang berwarna jingga kecoklatan sebagai akibat presipitasi MnO_2 . Karena itu diperlukan pengecekan warna air input yang berhubungan dengan kandungan bahan organik agar tidak menghasilkan presipitasi setelah ozonasi.

Ozon sebagai oksidan yang sangat reaktif, dalam proses ozonasi akan langsung membunuh mikroorganisme karena merusak dinding sel (lisis). Ozonasi tidak menghasilkan padatan terlarut dan tidak dipengaruhi oleh ion ammonium atau pengaruh pH dalam proses. Untuk removal bakteri dan virus, berlaku formula disinfeksi berikut:

$$\frac{dN}{dt} = kC^n N$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = kC^n t \quad (8.4)$$

di mana :

N = jumlah patogen pada waktu t

N₀ = jumlah patogen pada t = 0

C = konsentrasi disinfektan, mg/l

t = waktu, menit

k = koefisien kematian spesifik, (mg/l)⁻¹menit⁻¹

n = koefisien pengenceran

Kematian spesifik dari O₃ terhadap beberapa organisme untuk n = 1 :

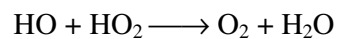
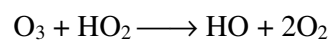
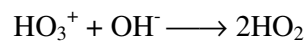
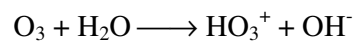
- enteric bacteria : 500

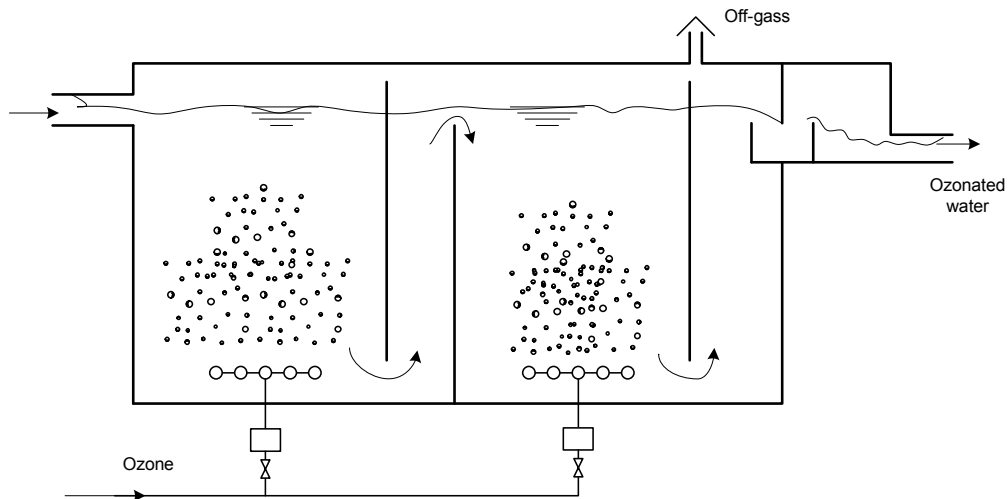
- virus : 5

- spora : 2

- cyst amuba : 0.5

Ozone yang digunakan sebagai disinfektan berasal dari generator yang dialirkan ke dalam bak kontak ozone (Gambar 8.5). Reaksi yang terjadi dalam air:





Gambar 8. 5 Bak kontak ozone

Pada reaksi itu terbentuk radikal bebas, HO_2 dan HO , yang mempunyai kekuatan oksidasi besar dan merupakan bentuk yang aktif dalam proses disinfeksi. Radikal bebas ini juga mempunyai kekuatan oksidasi untuk bereaksi dengan pengotor lain dalam larutan.

Bila ozon masuk ke dalam air, akan terjadi dua kemungkinan, yaitu oksidasi langsung yang berlangsung lambat dan selektif, dan auto-dekomposisi menjadi radikal hidroksil yang berlangsung cepat. Auto-dekomposisi dipercepat oleh adanya radikal hidroksil, radikal organik, hidrogen peroksida, sinar ultra violet, atau ion hidroksida dalam konsentrasi tinggi. Radikal hidroksil dapat mengoksidasi organik dengan cepat dan tidak selektif. Oksidasi langsung akan terjadi bila pH air rendah dan auto-dekomposisi akan terjadi bila pH air tinggi.

Ozon bereaksi dengan senyawa anorganik seperti ion nitrat, besi, mangan, sulfida, dan amonium. Oksidasi substansi anorganik ini dengan proses ozonisasi sangat cepat dan lengkap. Ozon, sebagai oksidan yang kuat dan efektif, merusak banyak senyawa organik penyebab warna, rasa, dan bau dalam air minum. Oleh karena itu, ini secara luas digunakan untuk mengendalikan rasa dan bau, menyisihkan warna dan menyisihkan besi dan mangan.

Ozon juga bereaksi dengan bahan organik alami (NOMs=*natural organic matters*), di antaranya senyawa alifatik dan aromatik, asam humat dan pestisida. Ozon

menguraikan senyawa organik menjadi jenis molekul yang lebih rendah, seperti aldehid dan keton.

Keuntungan dan kerugian ozon dalam pengolahan air minum tercantum pada Tabel 8.4. Sedangkan perbandingan berbagai bahan kimia sebagai disinfektan dapat dilihat pada Tabel 8.5.

Tabel 8.4 Keuntungan dan Kerugian Ozon sebagai Disinfektan

Keuntungan	Kerugian
<ol style="list-style-type: none"> 1. Masalah rasa, bau dan warna dapat dikurangi 2. Bahan organik pengotor dapat dioksidasi dengan cepat. 3. Disinfeksi efektif dapat dicapai pada kisaran pH dan suhu yang luas. 4. Efek membunuh bakteri dan spora cepat (300 hingga 3000 kali lebih cepat daripada klor), diperlukan waktu kontak yang pendek 5. Tidak timbul bau akibat dari pembentukan kompleks 6. Mereduksi bahan pengonsumsi klor 7. Memperbaiki efisiensi pengolahan secara keseluruhan 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sisa ozon tidak bertahan lama 2. Diperlukan input energi listrik yang tinggi dan biaya investasi dan operasi yang besar (sekitar 10 sampai 15 kali lebih tinggi daripada klor) 3. Suhu dan kelembaban yang tinggi dapat mempersulit penghasilan ozon 4. Proses kurang fleksibel terhadap variasi debit dan kualitas air 5. Teknik analisis yang kurang spesifik atau sensitif untuk pengendalian proses yang efisien 6. Air dengan kandungan bahan organik dan alga yang tinggi memerlukan pengolahan pendahuluan untuk mengurangi bahan pengonsumsi ozon.

Sumber: Qasim *et al.* (2000)

TABEL 8.5 Perbandingan Berbagai Bahan Disinfektan

Karakteristik	Klor	Natrium Hipoklorit	Kalsium Hipoklorit	Klor Dioksida	Ozone
Rumus Kimia	Cl ₂	NaOCl	Ca(OCl) ₂	ClO ₂	O ₃
Bentuk	Cair, gas	Larutan	Serbuk, pellet atau 1% larutan	Gas	Gas
Kontainer	45,5 dan 68 kg silinder dan 907 kg container	N/A	45 sampai 360 kg, drum	Produksi setempat	Produksi setempat
Pengangkutan	49900 dan 81600 kg mobil tangki dan 13600 sampai 20000 kg truk tanki	4,9 sampai 7,6 m ³ mobil tangki	N/A	N/A	N/A
Persen di pasaran	100	12-15	70	Hingga 0,35	2
Kestabilan	Stabil	Cairan kuning terang, tidak stabil	Stabil	Gas kuning kehijauan, mudah meledak	Tidak stabil
Toksitas terhadap mikroorganisme	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi
Tingkat bahaya dalam penggunaan dan penanganan	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi
Tingkat korosi	Tinggi	Sedang	Sedang	Tinggi	Tinggi
Penghilangan bau	Tinggi	Sedang	Sedang	Tinggi	Tinggi
Harga	Rendah	Sedang	Sedang	Sedang	Tinggi
Penerapan secara umum	Pengendalian pertumbuhan lendir, rasa dan bau, oksidasi amonia, disinfeksi	Pengendalian pertumbuhan lendir, disinfeksi	Pengendalian pertumbuhan lendir, disinfeksi	Pengendalian pertumbuhan lendir, bau, disinfeksi	Pengendalian rasa, bau, oksidasi prekursor dan organik <i>refractory</i> , desinfeksi

Sumber: Qasim *et al.* (2000)

Daftar Bacaan

- Alaerts, G. dan Santika, Sri S., *Metoda Penelitian Air*, Usaha Nasional Surabaya, 1987
- Benefield, L.D., *Process Chemistry for Water and Wastewater Treatment*, Prentice-Hall, New Jersey, 1982
- Droste, Ronald L., *Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997
- Fair, Gordon M., Geyer, John C., dan Okun, Daniel A., *Water and Wastewater Engineering, Volume 2: Water Purification and Wastewater Treatment and Disposal*, John Wiley and Sons Inc. New York, 1981
- Kawamura, Susumu, *Integrated Design of Water Treatment Facilities*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1991
- Qasim, S.R., Motley, E.M., dan Zhu, G., *Water Work Engineering: Planning, Design & Operation*, Prentice Hall PTR, Texas, 2000
- Reynolds, Tom D. dan Richards, Paul A., *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering*, PWS Publishing Company, Boston, 1996
- Sawyer, Clair N., McCarty, Perry L. dan Parkin, Gene F. (), *Chemistry for Environmental Engineering*, 4th edition, McGraw-Hill Inc. New York, 1994
- Schulz, C.R. dan Okun, Daniel A., *Surface Water Treatment for Communities in Developing Countries*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1984