

## BAB 2

### PENGADUKAN

Pengadukan (mixing) merupakan suatu aktivitas operasi pencampuran dua atau lebih zat agar diperoleh hasil campuran yang homogen. Pada media fase cair, pengadukan ditujukan untuk memperoleh keadaan yang turbulen (bergolak).

Aplikasi pada bidang teknologi lingkungan pengadukan digunakan untuk proses fisika seperti pelarutan bahan kimia dan proses pengentalan (thickening), proses kimiawi seperti koagulasi-flokulasi dan disinfeksi, proses biologis untuk mencampur bakteri dan air limbah.

Pada bab ini akan difokuskan pada teori pengadukan untuk proses koagulasi dan flokulasi. **Koagulasi** merupakan proses destabilisasi koloid dan partikel dalam air dengan menggunakan bahan kimia (disebut koagulan) yang menyebabkan pembentukan inti gumpalan (presipitat). Proses koagulasi hanya dapat berlangsung bila ada pengadukan. **Flokulasi** adalah proses penggabungan inti flok sehingga menjadi flok berukuran lebih besar. Proses flokulasi hanya dapat berlangsung bila ada pengadukan.

Pengadukan pada proses koagulasi dan flokulasi merupakan pemberian energi agar terjadi tumbukan antar partikel tersuspensi dan koloid agar terbentuk gumpalan (flok) sehingga dapat dipisahkan melalui proses pengendapan dan penyaringan.

## 2.1. Teori Koagulasi-Flokulasi

Partikel yang tersuspensi dalam air dapat berupa partikel bebas dan koloid dengan ukuran sangat kecil yaitu  $10^{-7}$  mm -  $10^{-1}$  mm. Karena dimensinya ini maka partikel tidak dapat diendapkan secara langsung (lihat Tabel 2.1). Di samping itu partikel dan koloid umumnya bermuatan listrik sama yang menyebabkan terjadinya tumbukan antar partikel (terjadi gerak Brown). Hal ini berakibat terjadinya suatu suspensi yang sangat stabil.

Tabel 2.1 Pengendapan Partikel dalam Air

Diameter Partikel (mm)	Tipe Partikel	Waktu Pengendapan pada Kedalaman 1 Meter
10	Kerikil	1 detik
1	Pasir	10 detik
$10^{-1}$	Pasir Halus	2 menit
$10^{-2}$	Lempung	2 jam
$10^{-3}$	Bakteri	8 hari
$10^{-4}$	Koloid	2 tahun
$10^{-5}$	Koloid	20 tahun
$10^{-6}$	Koloid	200 tahun

Sumber: *Water Treatment Handbook Vol. 1 (1991)*

Koloid merupakan partikel yang tidak dapat mengendap secara alami karena adanya stabilitas suspensi koloid. Stabilitas koloid terjadi karena:

- gaya tarik van der waal's
- gaya tolak /repulsive elektrostatik

Koagulasi bertujuan untuk mengurangi stabilitas koloid (proses destabilisasi) melalui penambahan bahan kimia dengan muatan berlawanan.

Pada koagulasi akan terjadi :

- Penurunan tegangan permukaan (zeta potensial) melalui proses netralisasi muatan dan adsorpsi.
- Presipitasi dari koagulan akan menyapu koloid
- Adsorpsi dan pembentukan jembatan antar partikel.

Pada flokulasi, kontak antar partikel melalui dua mekanisme, yaitu:

- *Thermal motion* yang dikenal dengan *brownian motion* atau difusi atau disebut sebagai flokulasi **perikinetik**.
- Gerakan cairan oleh aktifitas pengadukan atau flokulasi **ortokinetik**.

### A. Perikinetik

Perubahan konsentrasi partikel terhadap waktu pada perikinetik ( $J_{pk}$ ) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$J_{pk} = \frac{dN_o}{dt} = -\frac{4 \cdot \eta \cdot k \cdot T}{3\mu} N_o^2 \quad (2.1)$$

dalam hal ini:

- $N_o$  = Jumlah konsentrasi partikel pada waktu  $t$ .
- $\eta$  = Faktor efisiensi
- $k$  = konstanta Boltzman's ( $1,38 \times 10^{-16}$  erg/°K)
- $T$  = temperatur absolut (°K)
- $\mu$  = viskositas cairan (kg/m.dt)

Dari rumus tersebut terlihat bahwa laju perubahan konsentrasi pada Perikinetik tidak bergantung ukuran/diameter partikel akan tetapi bergantung pada konsentrasin partikel. Bila persamaan di atas diintegrasikan akan diperoleh:

$$N_t = \frac{N_0}{1 + \left(\frac{4 \cdot \eta \cdot k \cdot T \cdot N_0}{3\mu}\right) \cdot t} \quad (2.2)$$

$N_t$  dan  $N_0$  berturut-turut adalah konsentrasi partikel pada waktu  $t$  dan  $t=0$ .

## B. Ortokinetik

Pada ortokinetik, perubahan konsentrasi dirumuskan:

$$J_{ok} = \frac{dN_0}{dt} = \frac{2 \cdot \eta \cdot G \cdot d^3}{3} N_0^2 \quad (2.3)$$

dalam hal ini:

- d = diameter koloid
- G = gradien kecepatan.

Persamaan (2.3) menunjukkan bahwa perubahan konsentrasi bergantung diameter partikel.

Ratio  $J_{ok}/J_{pk}$  dapat ditulis :

$$\frac{J_{ok}}{J_{pk}} = \frac{\mu \cdot G \cdot d^3}{2 \cdot k \cdot T} \quad (2.4)$$

Persamaan tersebut menyatakan bahwa untuk partikel yang sangat kecil, perikinetik lebih dominan. Untuk partikel dengan diameter  $d=1 \mu\text{m}$  dan  $G = 10$  per detik akan dicapai  $J_{ok} = J_{pk}$ .

Partikel dengan ukuran  $< 1 \mu\text{m}$  akan memerlukan  $G$  yang lebih besar, misal untuk  $d = 0,1$  membutuhkan  $G = 10.000$  per detik yang secara teoritis sukar untuk dicapai sehingga perlu dibantu dengan flokulasi perikinetik. Laju

tumbukan partikel setara dengan “gradien kecepatan (G)”. Jumlah total tumbukan partikel proporsional dengan produk gradien kecepatan (G) dan waktu tumbukan (t),

$$N_{\text{tumbukan}} \approx G \cdot t \quad (2.5)$$

## 2.2. Jenis Pengadukan

Jenis pengadukan dalam pengolahan air dapat dikelompokkan berdasarkan kecepatan pengadukan dan metoda pengadukan. Berdasarkan kecepatannya, pengadukan dibedakan menjadi **pengadukan cepat** dan **pengadukan lambat**. Kecepatan pengadukan dinyatakan dengan **gradien kecepatan**, yang merupakan fungsi dari tenaga yang disuplai (P):

$$G = \sqrt{\frac{W}{\mu}} = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}} \quad (2.6)$$

dalam hal ini:

- W = tenaga yang di suplai per satuan volume air (N-m/detik.m<sup>3</sup>)
- P = suplai tenaga ke air (N.m/detik)
- V = volume air yang diaduk, m<sup>3</sup>
- μ = viskositas absolut air, N.detik/m<sup>2</sup>.

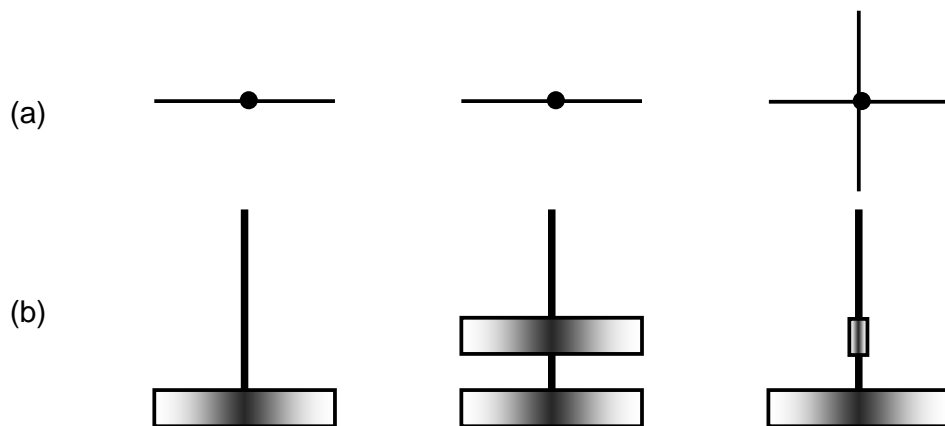
Besarnya gradien kecepatan akan mempengaruhi waktu pengadukan yang diperlukan. Makin besar nilai G, maka waktunya makin pendek. Untuk menyatakan kedua parameter itu, maka digunakan bilangan Camp, yaitu hasil perkalian gradien kecepatan dengan waktu pengadukan atau G.td.

Persamaan (2.6) berlaku umum untuk semua jenis pengadukan. Parameter yang membedakannya adalah besarnya tenaga yang disuplai ke dalam air ( $P$ ) yang dapat dihitung dengan rumus-rumus yang akan dijelaskan pada pasal 2.3. Rumus yang digunakan untuk menghitung nilai  $P$  sangat bergantung pada metoda pengadukan yang digunakan.

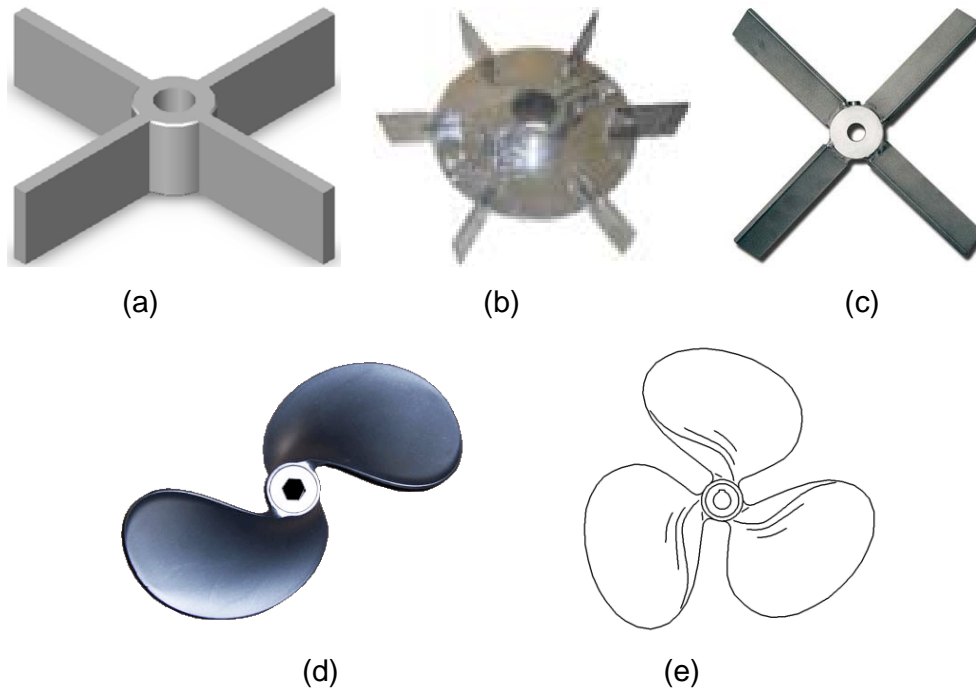
Berdasarkan metodenya, pengadukan dibedakan menjadi pengadukan mekanis, pengadukan hidrolis, dan pengadukan pneumatis.

**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*).

Berdasar pada bentuknya, telah dikenal tiga macam *impeller*, yaitu *paddle* (*pedal*), *turbine*, dan *propeller* (*baling-baling*). Bentuk ketiga *impeller* tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.1 dan Gambar 2.2. Kriteria *impeller* dapat dilihat pada Tabel 2.2.



Gambar 2.1 Tipe *paddle* (a) tampak atas, (b) tampak samping



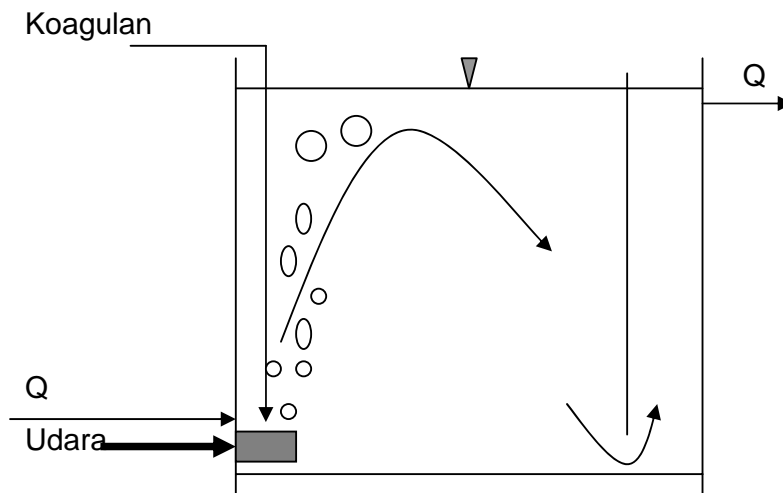
Gambar 2.2 Tipe *turbine* dan *propeller*. (a) turbine blade lurus, (b) turbine blade dengan piringan, (c) turbin dengan blade menyerong, (d) propeller 2 blade, (e) propeller 3 blade (Qasim, et al., 2000)

Tabel 2.2 Kriteria Impeller

Tipe Impeller	Kecepatan Putaran	Dimensi	Keterangan
Paddle	20 - 150 rpm	diameter: 50-80% lebar bak lebar: 1/6-1/10 diameter paddle	
Turbine	10-150 rpm	diameter:30-50% lebar bak	
Propeller	400-1750 rpm	diameter: max. 45 cm	jumlah pitch 1-2 buah

**Pengadukan hidrolis** adalah pengadukan yang memanfaatkan gerakan air sebagai tenaga pengadukan. Sistem pengadukan ini menggunakan energi hidrolis yang dihasilkan dari suatu aliran hidrolis. Energi hidrolis dapat berupa energi gesek, energi potensial (jatuhan) atau adanya lompatan hidrolis dalam suatu aliran. Beberapa contoh pengadukan hidrolis adalah terjunan, loncatan hidrolis, *parshall flume*, *baffle basin (baffle channel)*, *perforated wall*, *gravel bed* dan sebagainya.

**Pengadukan pneumatis** adalah pengadukan yang menggunakan udara (gas) berbentuk gelembung yang dimasukkan ke dalam air sehingga menimbulkan gerakan pengadukan pada air (Gambar 2.3). 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 ke permukaan air. Makin besar tekanan udara, kecepatan gelembung udara yang dihasilkan makin besar dan diperoleh turbulensi yang makin besar pula.



Gambar 2.3 Pengadukan pneumatis

### 2.3. Tenaga Pengadukan

Besarnya tenaga ( $P$ ) untuk operasi pengadukan akan mempengaruhi besarnya gradien kecepatan yang dihasilkan. Bila suatu sistem pengadukan telah ditentukan nilai gradien kecepatannya, maka tenaga pengadukan dapat dihitung. Tenaga pengadukan dihasilkan oleh suatu sistem pengadukan, misalnya alat pengaduk dan kecepatan putarannya, aliran air, hembusan udara, dan sebagainya.



Perhitungan tenaga pengadukan berbeda-beda bergantung pada jenis pengadukannya. Pada pengadukan mekanis, yang berperan dalam menghasilkan tenaga adalah bentuk dan ukuran alat pengaduk serta kecepatan alat pengaduk itu diputar (oleh motor). Hubungan antar variabel itu dapat dinyatakan dengan persamaan (2.7) untuk nilai  $N_{Re}$  lebih dari 10.000:

$$P = K_T \cdot n^3 \cdot D_i^5 \cdot \rho \quad (2.7)$$

dan persamaan (2.8) untuk nilai  $N_{Re}$  kurang dari 20

$$P = K_L \cdot n^2 \cdot D_i^3 \cdot \mu \quad (2.8)$$

Bilangan Reynold untuk suatu pengaduk dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$N_{Re} = \frac{D_i^2 n \rho}{\mu} \quad (2.9)$$

Keterangan untuk pers. (2.7), (2.8), dan (2.9) adalah:

- P = tenaga , N-m/det.
- $K_T$  = Konstanta pengaduk untuk aliran turbulen
- n = Kecepatan putaran, rps.
- $D_i$  = Diameter pengaduk, m
- $\rho$  = Massa jenis air,  $\text{kg/m}^3$
- $K_L$  = konstanta pengaduk untuk aliran laminar
- $\mu$  = Kekentalan absolute cairan, (N-det/ $\text{m}^2$ ).

Nilai  $K_T$  dan  $K_L$  untuk tangki bersekat 4 buah baffle pada dinding tangki, dengan lebar baffle 10 % dari diameter tangki diberikan pada tabel 2.3.

Tabel 2.3 Konstanta  $K_T$  dan  $K_L$  untuk tangki bersekat

Jenis Impeller	$K_L$	$K_T$
Propeller, pitch of 1, 3 blades	41,0	0,32
Propeller, pitch of 2, 3 blades	43,5	1,00
Turbine, 4 flat blades, vaned disc	60,0	5,31
Turbine, 6 flat blades, vaned disc	65,0	5,75
Turbine, 6 curved blades	70,0	4,80
Fan turbine, 6 blades at 45 °	70,0	1,65
Shroude turbine, 6 curved blades	97,5	1,08
Shrouded turbine, with stator, no baffles	172,5	1,12
Flat paddles, 2 blades (single paddle), $D_i/W_i = 4$	43,0	2,25
Flat paddles, 2 blades , $D_i/W_i = 6$	36,5	1,70
Flat paddles, 2 blades , $D_i/W_i = 8$	33,0	1,15
Flat paddles, 4 blades , $D_i/W_i = 6$	49,0	2,75
Flat paddles, 6 blades , $D_i/W_i = 8$	71,0	3,82

Pada pengadukan hidrolis, tenaga dapat dituliskan sebagai berikut:

$$P = Q \cdot \rho \cdot g \cdot h \quad (2.10)$$

dimana : P = tenaga , N-m/det

Q = debit aliran, m<sup>3</sup>/det

$\rho$  = berat jenis, kg/m<sup>3</sup>

g = percepatan gaya gravitasi, 9,8 m/det<sup>2</sup>

h = tinggi jatuhan, m

= kehilangan energi akibat gesekan (head loss)

Penggabungan pers. (2.10) ke dalam pers. (2.6) menghasilkan:

$$G = \sqrt{\frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot h}{\mu \cdot V}} = \sqrt{\frac{g \cdot h}{\nu \cdot td}} \quad (2.11)$$

dimana :  $\nu = \mu/\rho$ , viskositas kinematis, m<sup>2</sup>/det.

$td = V/Q =$  waktu tinggal hidrolis, detik.

Nilai  $h$  dapat dihitung dengan rumus sbb :

a. Dalam pipa :  $h_L = f \frac{LV^2}{D \cdot 2 \cdot g}$

b. Kanal bersekat :  $h_L = k \frac{V^2}{2 \cdot g}$

c. Media berbutir :  $h_L = \frac{f}{\theta} \left( \frac{1-\alpha}{\alpha^3} \right) \frac{L}{d} \frac{V^2}{g}$

$$f = 150 \left( \frac{1-\alpha}{R_N} \right) + 1,75$$

$$R_N = \frac{d \cdot V \cdot \rho}{\mu}$$

dimana :  $d =$  rerata diameter butiran (m)

$L =$  kedalaman media berbutir

$\alpha =$  porositas butiran ( $\cong 0,4$ )

$V =$  Kecepatan aliran air (m/det)

$R_N =$  bilangan reynold

$\theta =$  factor bentuk ( $\cong 0,8$ )

Pada pengadukan dengan udara (pneumatis), tenaga yang dihasilkan merupakan fungsi dari debit udara yang diinjeksikan, yang dapat dituliskan sebagai berikut:

$$P = 3904.Ga.Log\left(\frac{h+10,4}{10,4}\right) \quad (2.12)$$

dimana : P = power, (N-m/s)  
 Ga = debit udara, m<sup>3</sup>/menit  
 h = kedalaman diffuser, m

### Contoh Soal 2.1.

Suatu bak pengaduk bujur sangkar, dengan kedalaman air sama dengan 1,25 kali lebar, direncanakan untuk suatu aliran dengan debit 7570 m<sup>3</sup>/hari. Gradien kecepatan diinginkan 790 mps/m, waktu tinggal hidrolis  $t_d = 40$  detik, suhu operasi 10 °C dan kecepatan putar poros turbine 100 rpm. Tentukan:

1. Ukuran bak pengaduk
2. Tenaga yang dibutuhkan
3. Diameter impeller jika digunakan vane-disc impeller 6 flat blades dan tangki memiliki 4 baffle tegak.
4. Diameter impeller jika tidak digunakan baffle tegak.
5. Tinggi jatuhan minimum jika dipergunakan sistim terjunan hidrolis
6. Udara yang dibutuhkan jika pengadukan pneumatis digunakan dan lokasi diffuser 0,15 di atas dasar tangki.

### Penyelesaian:

1. Volume tangki = Q x  $t_d$   
 $= 7570 \text{ m}^3/\text{hr} \times 1\text{hr}/1440 \text{ menit} \times 1 \text{ mnt}/60 \text{ det} \times 40 \text{ det}$   
 $= 3,50 \text{ m}^3$

$$\text{Volume} = P \times L \times H = L \times L \times 1,25 L = 3,50 \text{ m}^3$$

$$\text{Maka lebar bak} = 1,41 \text{ m dan } H = 1,25 \times 1,41 = 1,76 \text{ m}$$

2. Tenaga yang dibutuhkan :

$$P = (G^2)(\mu)(V) = \left(\frac{790}{\text{det}^2}\right)\left(\frac{0.00131N - \text{det}}{m^2}\right)\frac{m}{m}(3,5m^3) = 2863 \frac{N-m}{\text{det}}$$

$$= 2863 \text{ watt.}$$

3. Diameter impeller :

$$P = K_T \cdot n^3 \cdot D_i^5 \cdot \rho$$

dari tabel 2.3 didapatkan nilai  $K_T = 5,75$ ;  $n = 100 \text{ rpm} = 1,667 \text{ rps}$ .

Diameter impeller dapat ditentukan dari rumus di atas dan disusun lagi sbb :

$$D_i = \left( \frac{P}{K_T n^3 \rho} \right)^{1/5}$$

$$D_i = \left[ \left( \frac{2863N - m}{\det} \right) \left( \frac{1}{5.75} \right) \left( \frac{1}{(1.667 rps)^3} \right) \left( \frac{m^3}{999,7 kg} \right) \left( \frac{kg - m}{N - \det^2} \right) \right]^{1/5}$$

$$= 0,640 \text{ m}$$

$$D_i/W_i = 0,640/1,41 = 0,454 = 45,4 \%$$

Cek nilai Nre

$$N_{Re} = \frac{D_i^2 n \rho}{\mu} = \frac{(0,640m)^2 (1,667 rps) (999,7 kg / m^3) (N - \det^2)}{0,00131N - \det / m^2} \left( \frac{kg - m}{kg - m} \right)$$

$$= 521.000 \gg \gg 10.000 \text{ (OK)}$$

4. Jika tanpa sekat (baffle) tegak, tenaga yang dibutuhkan adalah 75 % dari tenaga untuk tangki bersekat. Jadi nilai  $K_T = 0,75 \times 5,75 = 4,31$ .

$$D_i = \left( \frac{P}{K_T n^3 \rho} \right)^{1/5}$$

$$D_i = \left[ \left( \frac{2863N - m}{\det} \right) \left( \frac{1}{4,31} \right) \left( \frac{1}{(1.667 rps)^3} \right) \left( \frac{m^3}{999,7 kg} \right) \left( \frac{kg - m}{N - \det^2} \right) \right]^{1/5}$$

$$= 0,678 \text{ m}$$

$$D_i/W = 0,678/1,41 = 0,481 = 48,1 \%$$

5. Jika digunakan sistem hidrolik, maka tinggi jatuhan dapat dihitung dengan rumus :

$$H = \frac{G^2 \cdot \mu \cdot t d}{\rho \cdot g} = \left( \frac{790}{\det} \right)^2 \left( \frac{0,00131N - \det}{m^2} \right) \left( \frac{1m^3}{999,7kg} \right) \left( \frac{40 \det}{9.81m / \det^2} \right) = 3,3 \text{ m}$$

6. Jika digunakan pengadukan pneumatis:

$$G_a = \frac{P / 3904}{\log \left( \frac{h + 10,4}{10,4} \right)}$$

$$h = 1,76 \text{ m} - 0,15 \text{ m} = 1,61 \text{ m}$$

sehingga :

$$G_a = \frac{2863/3904}{\log\left(\frac{1,61 + 10,4}{10,4}\right)} = 11,7 \frac{m^3}{menit}$$

---

#### 2.4. Pengadukan Cepat

Tujuan pengadukan cepat dalam pengolahan air adalah untuk menghasilkan turbulensi air sehingga dapat mendispersikan bahan kimia yang akan dilarutkan dalam air. Secara umum, pengadukan cepat adalah pengadukan yang dilakukan pada gradien kecepatan berkisar antara 100 hingga 1000 per detik selama 5 hingga 60 detik. Secara spesifik, nilai G dan td bergantung pada maksud atau sasaran pengadukan cepat.

Untuk proses koagulasi-flokulasi:

- Waktu detensi = 20 - 60 detik
- $G = 1000 - 700 \text{ detik}^{-1}$

Untuk penurunan kesadahan (pelarutan kapur/soda):

- Waktu detensi = 20 - 60 detik
- $G = 1000 - 700 \text{ detik}^{-1}$

Untuk presipitasi kimia (penurunan fosfat, logam berat, dll)

- Waktu detensi = 0,5 - 6 menit
- $G = 1000 - 700 \text{ detik}^{-1}$

Pengadukan cepat dapat dilakukan dengan beberapa cara antara lain:

1. Pengadukan mekanis
2. Pengadukan hidrolis
3. Pengadukan pneumatis

Pengadukan mekanis merupakan satu metoda yang paling umum digunakan untuk pengadukan cepat karena sangat efektif dan lebih fleksibel dalam operasi. Pengadukan mekanis yang sering digunakan dalam pengadukan cepat menggunakan ketiga macam impeller di atas.

Faktor penting dalam perancangan alat pengaduk mekanis adalah kedua parameter pengadukan, yaitu  $G$  dan  $t_d$ . Sekadar patokan, Tabel 2.4 dapat digunakan dalam pemilihan nilai  $G$  dan  $t_d$ .

Tabel 2.4 Nilai Gradien Kecepatan dan Waktu Pengadukan

Waktu Pengadukan, $t_d$ (detik)	Gradien Kecepatan (1/detik)
20	1000
30	900
40	790
$50 \geq$	700

Sumber: Reynold (1996)

Jenis pengadukan hidrolis yang digunakan pada pengadukan cepat haruslah aliran air yang menghasilkan energi hidrolis yang besar. Dalam hal ini dapat dilihat dari besarnya kehilangan energi (headloss) atau perbedaan muka air. Dengan tujuan menghasilkan turbulensi yang besar tersebut, maka jenis aliran yang sering digunakan sebagai pengadukan cepat adalah terjunan, loncatan hidrolis, dan parshall flume.

Aliran udara yang digunakan untuk pengadukan cepat harus mempunyai tekanan yang cukup besar sehingga mampu menekan dan menggerakkan air.

## 2.5. Pengadukan Lambat

Tujuan pengadukan lambat dalam pengolahan air adalah untuk menghasilkan gerakan air secara perlahan sehingga terjadi kontak antar partikel untuk membentuk gabungan partikel berukuran besar. Pengadukan lambat digunakan pada proses flokulasi, untuk pembesaran inti gumpalan. Gradien kecepatan diturunkan secara perlahan-lahan agar gumpalan yang telah terbentuk tidak pecah lagi dan berkesempatan bergabung dengan yang lain membentuk gumpalan yang lebih besar. Penggabungan inti gumpalan sangat tergantung pada karakteristik flok dan nilai gradien kecepatan.

Secara umum, pengadukan lambat adalah pengadukan yang dilakukan pada gradien kecepatan kurang dari 100 per detik selama 10 hingga 60 menit. Secara spesifik, nilai  $G$  dan  $t_d$  bergantung pada maksud atau sasaran pengadukan cepat.

Untuk proses koagulasi-flokulasi:

- Waktu detensi = 15 - 45 menit
- $G = 10 - 75 \text{ detik}^{-1}$
- $GT = 48.000 - 210.000$
- Untuk air sungai:

Waktu detensi = minimum 20 menit

$$G = 10 - 50 \text{ detik}^{-1}$$

- Untuk air waduk/reservoir:

Waktu = 30 menit

$$G = 10 - 75 \text{ detik}^{-1}$$

- Untuk air keruh:

Waktu dan  $G$  lebih rendah



- Bila menggunakan garam besi sbg koagulan:

$G$  tidak lebih dari  $50 \text{ detik}^{-1}$

- Untuk flokulator 3 kompartemen:
  - $G$  kompartemen 1 : nilai terbesar
  - $G$  kompartemen 2 : 40 % dari  $G$  komp. 1
  - $G$  kompartemen 3 : nilai terkecil

Untuk penurunan kesadahan (pelarutan kapur/soda):

- Waktu detensi = minimum 30 menit
- $G = 10 - 50 \text{ detik}^{-1}$

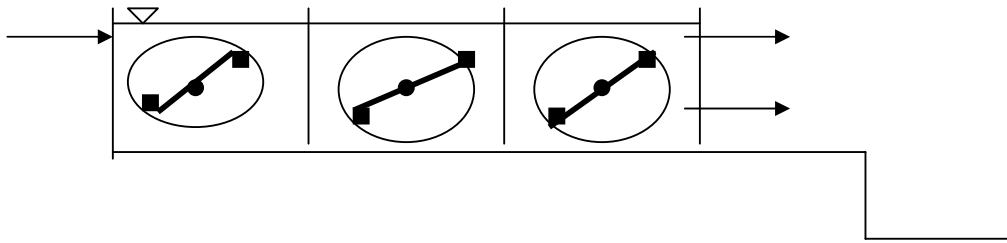
Untuk presipitasi kimia (penurunan fosfat, logam berat, dll)

- Waktu detensi = 15 - 30 menit
- $G = 20 - 75 \text{ detik}^{-1}$
- $GT = 10.000 - 100.000$

Pengadukan lambat dapat dilakukan dengan beberapa cara antara lain:

1. Pengadukan mekanis
2. Pengadukan hidrolis

Pengadukan mekanis merupakan satu metoda yang umum digunakan untuk pengadukan lambat. Pengaduk (disebut juga flokulator) mekanis yang sering digunakan dalam pengadukan lambat adalah tipe paddle yang dimodifikasi hingga membentuk roda (paddle wheel), baik dengan posisi horisontal maupun vertikal (Gambar 2.4).



Gambar 2.4 Flokulator pedal dengan blade tegak lurus aliran air (tipe horizontal shaft).

Besarnya energi/tenaga yang diterima oleh fluida akibat putaran *paddle wheel* tergantung pada gaya drag dan kecepatan relatif fluida terhadap pedal. Tenaga yang diperlukan untuk pengadukan sistem pedal dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$P = C_D A \rho \frac{v^3}{2} \quad (2.13)$$

Keterangan:

$P$  = tenaga, N-m/det

$C_D$  = koefisien drag

$A$  = luas permukaan paddle wheel,  $m^2$

$\rho$  = rapat massa air,  $kg/m^3$

$v$  = kecepatan relatif putaran paddle, m/det

Nilai  $C_D$  dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Nilai Koefisien Drag

Ratio L/W	$C_D$
5	1,20
20	1,50
~	1,90

Keterangan:

$L$  = panjang paddle

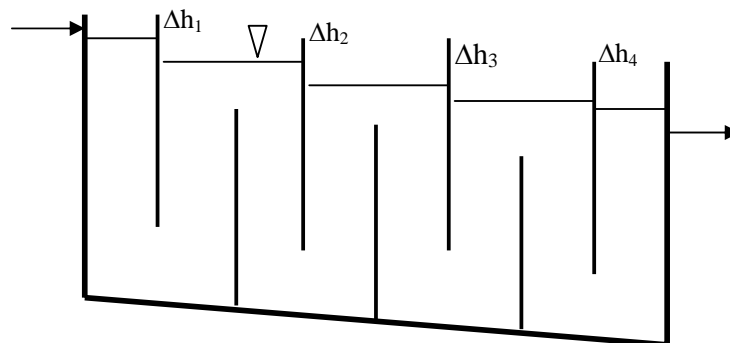
$W$  = lebar paddle

Bila paddle wheel tersusun oleh lebih dari satu pasang paddle (dengan ukuran yang sama), maka persamaan (2.13) berubah menjadi:

$$P = \frac{1}{2} C_D A \rho \sum v_i^3 \quad (2.14)$$

$$i = 1, 2, 3 \dots \dots n$$

Jenis pengadukan hidrolis yang digunakan pada pengadukan lambat berbeda dengan pengadukan cepat. Pada pengadukan lambat, energi hidrolis yang diharapkan cukup kecil dengan tujuan menghasilkan gerakan air yang mendorong kontak antar partikel tanpa menyebabkan pecahnya gabungan partikel yang telah terbentuk. Jenis aliran yang sering digunakan sebagai pengadukan lambat adalah *baffle channel*.



Gambar 2.5 Flokulator tipe baffle channel

Flokulator umumnya dibuat secara seri seiring penurunan nilai  $G$  agar diperoleh pencampuran sempurna, yaitu partikel dapat saling berkontak, sehingga diperoleh hasil akhir yang memuaskan. Total waktu detensi yang diperlukan untuk flokulator secara seri maksimum 45 menit.

Jumlah sekat dalam flokulator kanal bersekat (*baffle channel*) dapat ditentukan dengan rumus berikut :

1. Jumlah sekat dalam flokulator aliran horizontal:

$$n = \left\{ \left[ \frac{2\mu.t}{\rho(1.44 + f)} \right] \left[ \frac{H.L.G}{Q} \right]^2 \right\}^{1/3} \quad (2.15)$$

2. Jumlah sekat dalam flokulator aliran vertikal:

$$n = \left\{ \left[ \frac{2\mu.t}{\rho(1.44 + f)} \right] \left[ \frac{W.L.G}{Q} \right]^2 \right\}^{1/3} \quad (2.16)$$

dimana : h = head loss (m)

v = kecepatan fluida (m/det)

g = konstanta gravitasi ( 9,81 m/det<sup>2</sup>)

k = konstanta empiris ( 2,5 – 4)

n = jumlah sekat

H = kedalaman air dalam kanal (m)

L = panjang bak flokulator (m)

G = gradien kecepatan (1/det)

Q = debit aliran (m<sup>3</sup>/det)

t = waktu flokulasi (det)

μ = Kekenatalan dinamis air (kg/m.det)

ρ = Berat jenis air (kg/m<sup>3</sup>)

f = koefisien gesek sekat

W = lebar bak (m)

### Contoh Soal 2.2:

Rancanglah suatu flokulator kanal – bersekat (baffled channel) aliran horizontal untuk mengolah air dengan kapasitas 10.000 m<sup>3</sup>/hari. Bak flokulator dibagi dalam tiga ruang dengan gradien kecepatan masing – masing 50/detik ; 35/detik;25/detik. Waktu flokulasi keseluruhan 21 menit dan suhu air 15 °C. Dinding kanal memiliki nilai koefisien kekasaran 0.3. Panjang flokulator ditetapkan 10 m dan kedalaman kanal 1 m.

**Penyelasian :**

1. Dihitung flokulator pertama dengan gradient kecepatan,  $G = 50/\text{detik}$  dan waktu tinggal hidrolis,  $t_d = 7$  menit.

a. Total volume flokulator :

$$V = 21 \text{ menit} \times 10000 \text{ m}^3/\text{hari} \times 1 \text{ hari}/1440 \text{ menit} = 146 \text{ m}^3$$

b. Total lebar flokulator :

$$W = \frac{V}{L \times H} = \frac{146 \text{ m}^3}{10 \text{ m} \times 1 \text{ m}} \cong 15 \text{ m}$$

c. Lebar tiap seksi :  $W = 15 \text{ m}/3 = 5 \text{ m}$

d. Pada suhu  $15^\circ \text{C}$  nilai  $\mu = 1,14 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{det}$  dan  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

e. Jumlah sekat dalam flokulator pertama :

$$n = \left\{ \left[ \frac{2\mu \cdot t}{\rho(1.44 + f)} \right] \left[ \frac{H \cdot L \cdot G}{Q} \right]^2 \right\}^{1/3}$$

$$n = \left\{ \left[ \frac{2(1,14 \times 10^{-3})(7)(60)}{1000(1.44 + 0.3)} \right] \left[ \frac{(1.0)(10)(50)}{10000/86400} \right]^2 \right\}^{1/3} = 22$$

f. Jarak antar sekat =  $10/22 = 0,45 \text{ m}$

g. Head loss pada flokulator :

$$h = \frac{\mu \cdot t}{\rho \cdot g} G^2 = \frac{(1,14 \times 10^{-3})(7)(60)}{1000(9.81)} (50)^2 = 0.12 \text{ m}$$

2. Dengan cara yang sama dapat dihitung untuk kompartmen kedua dan ketiga.

Kompartmen kedua :

- $G$  = 35/detik
- $T_d$  = 7 menit
- Jumlah sekat = 16
- Jarak antar sekat = 0,62 m
- Head loss = 0,06 m

3. Kompartmen ketiga :

- $G$  = 25/detik
- $T_d$  = 7 menit
- Jumlah sekat = 13
- Jarak antar sekat = 0,77 m
- Head loss = 0,03 m

4. Total head loss =  $0,12 + 0,06 + 0,03 = 0,21 \text{ m}$ .

**Contoh Soal 2.3:**

Suatu paket pengolahan air memiliki kapasitas pengolahan sebesar  $270 \text{ m}^3/\text{hari}$  memiliki gravel-bed flokulator yang terdiri dari 5 bagian filter berbentuk empat persegi panjang. Gravel memiliki porositas 0,4 dan suhu air  $20^\circ \text{C}$  ( $\mu = 1,01 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{det}$ ; berat jenis =  $998 \text{ kg/m}^3$ )

Data gravel adalah sbb :

No	Panjang filter(m)	Lebar filter (m)	Tinggi filter (m)	Ukuran gravel (cm)
1	1,0	0,05	0,2	0,5 – 1,0
2	1,0	0,13	0,2	0,5 – 1,0
3	1,0	0,23	0,2	0,5 – 1,0
4	1,0	0,35	0,2	1,0 – 2,0
5	1,0	0,51	0,2	1,0 – 2,0

Hitunglah : Waktu flokulasi nominal dalam sistem; gradien kecepatan dan head loss untuk tiap filter.

### Penyelesaian :

#### 1. Waktu nominal

- Vol =  $1,0 \times 0,2 \times (0,05 + 0,13 + 0,23 + 0,35 + 0,51) = 0,254 \text{ m}^3$
- Waktu nominal :  $t = \text{Vol}/Q = 0,254 / (270/86400) = 81,3 \text{ detik}$

#### 2. Head loss dan gradien kecepatan :

- Beban permukaan =  $Q/A_{\text{surface}} = (270 \times 86400) / (1,0 \times 0,05) = 0,06 \text{ m/det}$

#### b. Head loss pada filter 1 :

##### i. Bilangan Reynold:

$$N_{\text{Re}} = \frac{d.v.\rho}{\mu} = \frac{0,0075 \times 0,06 \times 998}{1,01 \times 10^{-1}} = 445$$

##### ii. Faktor gesekan :

$$f = 150 \left[ \frac{1-\alpha}{N_{\text{Re}}} \right] + 1,75 = 150 \left[ \frac{1-0,4}{445} \right] = 1,95$$

##### iii. Head loss :

$$h = \frac{f}{\theta} \left( \frac{1-\alpha}{\alpha^3} \right) \frac{L v^2}{d g} = \frac{1,95}{0,8} \times \left( \frac{1-0,4}{0,4^3} \right) \times \frac{0,2}{0,0075} \times \frac{(0,06)^2}{9,8} = 0,22$$

- Volume =  $1,0 \times 0,05 \times 0,2 = 0,01 \text{ m}^3$

#### d. Gradien kecepatan :

$$G = \left[ \frac{(h.\rho.g.Q)}{(\mu.\alpha.V)} \right]^{1/2} = \left[ \frac{0,22 \times 998 \times 9,8 \times 270}{(1,01 \times 10^{-3}) \times 0,4 \times 0,01 \times 86400} \right]^{1/2} = 1290 / \text{det.}$$

3. Dengan cara yang sama dapat dihitung untuk bagian filter yang lain :

No.Lapis filter	Head loss(Cm)	Gradien kecepatan, G/det
1	20	1290
2	4,1	345
3	1,7	165
4	0,34	60
5	0,16	35

## 2.6. Rangkuman

1. Pengaduk cepat dan pengaduk lambat digunakan untuk melaksanakan proses Koagulasi dan flokulasi.
2. Koagulasi berupa pengadukan cepat dengan nilai G (500 – 1000 /det) untuk distribusi koagulan sekaligus pembentukan inti gumpalan.
3. Flokulasi berupa pengadukan lambat dengan nilai G menurun secara gradual berfungsi untuk pembesaran inti gumpalan agar diperoleh gumpalan yang besar.
4. Besarnya energi pengadukan untuk proses koagulasi dan flokulasi dinyatakan sebagai G ( gradien kecepatan).
5. Keberhasilan proses koagulasi dan flokulasi ditentukan oleh nilai G.td.
6. Pengadukan cepat dan lambat dapat dilakukan dengan cara mekanis, hidrolis dan pneumatic.
7. Pengadukan mekanis menggunakan motor pengaduk dan unit pengaduk. Pengaduk dapat berupa propeller, pedal, dan blade.

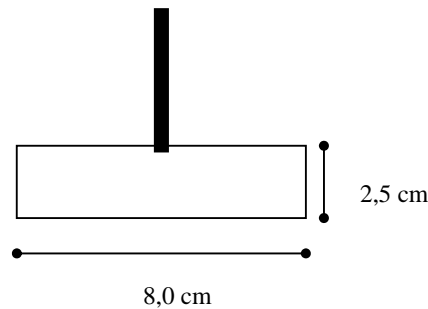
8. Pengaduk hidrolis dilakukan dengan mengandalkan energi hidrolis berupa terjunan air, energi gesekan (head loss) pada perpipaan, kanal bersekat, media berbutir dll.
9. Pengadukan Pneumatik menggunakan udara yang dilepaskan oleh suatu kompressor.

## 2.7. Soal-soal

1. Jelaskan pentingnya mixing pada proses koagulasi dan flokulasi.
2. Jelaskan langkah-langkah perancangan alat pengaduk cepat dan lambat. Lengkapi dengan persamaan-persamaan yang digunakan.
3. Pengaduk mekanis berupa propeller 3 blades berdiameter 40 cm diputar dengan kecepatan 425 rpm.
  - a. Tentukan dimensi bak agar diperoleh gradient kecepatan 825 m/detik-m
  - b. Berapa debit air yang dapat diolah ?
4. Tangki pengaduk cepat berbentuk bujur sangkar dengan debit  $8 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/hari, memiliki kedalaman 1,25 kali lebar. Nilai  $G = 1000$ /detik dan suhu 15°C, waktu detensi 30 detik. Pengaduk berupa vans disk impeller dengan 6 blade. Tentukanlah: Dimensi tangki, kebutuhan power input, kecepatan impeller jika diameter impeller 50 % lebar tangki.



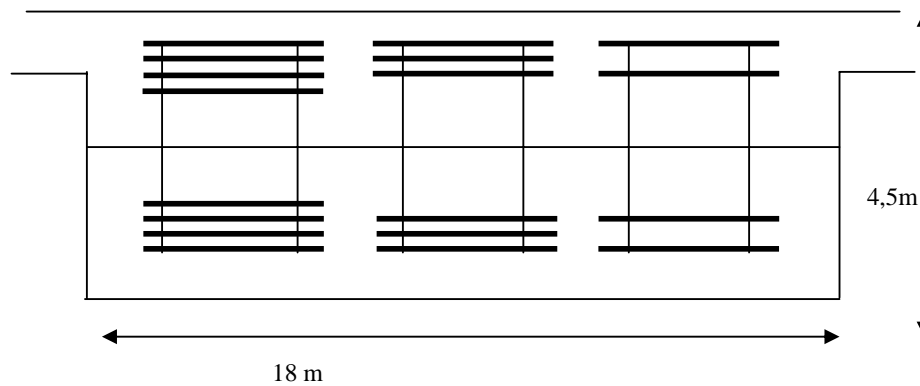
5. Berapa debit udara yang diperlukan untuk menjaga nilai G sebesar 500/detik dalam suatu tangki dengan kedalaman 2,75 m dan waktu tinggal air selama 5 menit, suhu air 20 °C.
6. Pada percobaan jar test digunakan gelas beaker berisi 1 liter air dengan paddle berukuran seperti gambar berikut:



Pertanyaan:

- a. Bila paddle diputar dengan kecepatan 100 rpm selama 1 menit, hitunglah gradien kecepatan yang dihasilkan oleh putaran paddle tersebut.
  - b. Bila akan digunakan sebagai pengaduk lambat, berapakah kecepatan paddle harus diputar?
7. Sistem IPAM memiliki flokulator seperti gambar di bawah untuk mengolah air dengan debit 12000 m<sup>3</sup>/hari. Flokulator terdiri dari tiga kompartemen dengan bentuk yang sama, panjang total 18 m dan tinggi 4,5 m dan lebar 4,5 m. Kompartemen pertama memiliki 4 buah pedal dengan jarak dari poros sebesar 1,9 ; 1,7 ; 1,5; 1,3 m. Kompartemen kedua memiliki 3 buah pedal dengan jarak dari poros 1,9 ; 1,7; 1,5 m, sedangkan kompartemen ketiga memiliki 2 buah pedal dengan jarak dari poros sebesar 1,9 dan 1,5

m. Setiap pedal memiliki ukuran lebar 0,1 m dan panjang 4,5 m. Pada suhu 25 °C Hitung kecepatan putar poros agar nilai G rata – rata 20 /det.



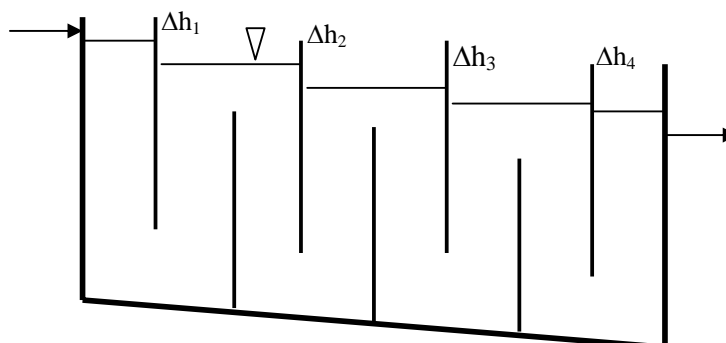
8. Buatlah rancangan alat pengaduk mekanis tipe paddle wheel untuk mengaduk air (slow mixing) dengan debit 100 l/detik sehingga dihasilkan GT yang menurun masing-masing 70000, 55000, dan 45000 (waktu detensi total 45 menit).

Rancangan meliputi:

- bentuk dan dimensi bak dan alat pengaduk
- kecepatan putaran
- power motor yang diperlukan

Temperatur air = 30°C

9. Gambar berikut adalah potongan memanjang baffle basin:



Kedalaman air : 1,5 meter

Panjang bak : 15 meter

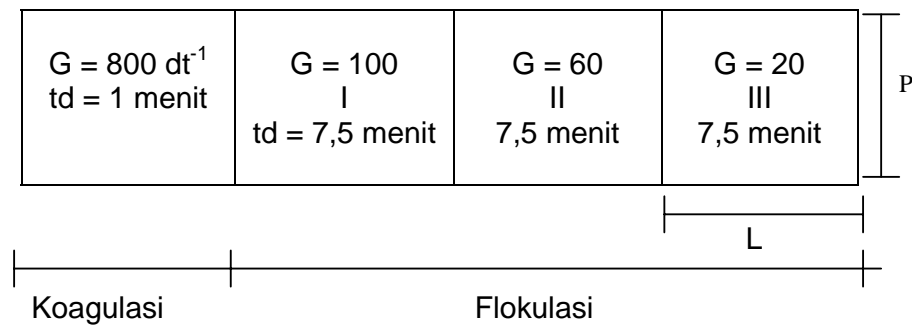
Lebar bak : 2 meter

Headloss : lihat gambar,  $\Delta h_1 = \Delta h_4 = 4$  cm,  $\Delta h_2 = \Delta h_3 = 7$  cm

Hitunglah bilangan Camp!

10. Koagulasi-Flokulasi di lakukan dalam satu sistem baffle chanel horisontal

flow dengan debit air yang diolah 150 lt/dt.  $v = 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/dt



#### a. Koagulasi

- Hitung berapa luas area ( $P \times L$ ) koagulasi jika kedalaman air 1 meter
- Hitung berapa headloss yang diperlukan di unit koagulasi ( $g = 9,81$  m/dt<sup>2</sup>)
- Hitung berapa jumlah skat horisontal
- Berapa jarak/lebar di belokan
- Gambarkan hasil perhitungannya.

#### b. Flokulasi

- Hitung berapa luas ( $P \times L$ ) pada unit flokulasi jika panjang bak disesuaikan dengan bak koagulasi

- Hitung berapa headloss yang diperlukan di masing-masing bak flokulasi
- Hitung berapa jumlah skat horisontal
- Berapa jarak/lebar di belokan
- Gambarkan hasil perhitungannya.

### 2.8. Bahan Bacaan

1. -----, *Water Treatment Handbook*, 6<sup>th</sup> edition, Volume 1, Degremont Water and the Environment, 1991.
2. Droste, Ronald L., *Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment*, John Wiley & Sons, Inc., 1997.
3. Peavy, Howard S., Donald R. Rowe, dan George T., *Environmental Engineering*, McGraw-Hill Publishing Company, 1985.
4. Qasim, Syed R, Edward M. Motley, dan Guang Zhu, *Water Works Engineering: Planning, Design dan Operation*, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ 07458, 2000.
5. Reynold, Ton D. dan Richards, Paul A., *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering*, 2<sup>nd</sup> edition, PWS Publishing Company, Boston, 1996.
6. Rich, Linvil G., *Unit Operations of Sanitary Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., 1974.
7. Sincero, Arcadio P. dan Gregorio A. Sincero, *Environmental Engineering*, Prentice Hall, 1996.
8. Tchobanoglous, George, *Wastewater Engineering, Treatment, Disposal, and Reuse*, 3<sup>rd</sup> edition, Metcalf & Eddy, Inc. McGraw-Hill, Inc. New York, 1991.