

## MENENTUKAN PERSAMAAN KECEPATAN PENGENDAPAN PADA SEDIMENTASI

Setiyadi, Suratno Lourentius, Ezra Ariella W.\*, Gede Prema M.S.  
Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Widya Mandala, Surabaya, Indonesia

### ABSTRAK

*Sedimentasi merupakan metode pemisahan antara padatan dengan cairan menggunakan gaya gravitasi. Proses sedimentasi berperan penting dalam berbagai proses industri, misalnya pada proses pemurnian air limbah, pengolahan air sungai, pengendapan partikel padatan pada bahan makanan cair, pengendapan kristal dari larutan induk, pengendapan minuman partikel terendap pada industri beralkohol, pengendapan bubur kertas atau pulp pada industri kertas, dan sebagainya. Dalam proses sedimentasi, salah satu faktor yang ikut menentukan waktu sedimentasi adalah kecepatan partikel padatan yang turun ke bawah, sehingga dengan mengetahui kecepatan pengendapan dapat memperkirakan waktu pengendapan yang efektif guna merancang tempat sedimentasi. Cara ini dapat dilakukan dengan cara menentukan kecepatan sedimentasi melalui berbagai metode yang ada di literatur, namun dari beberapa metode tersebut akan menghasilkan harga kecepatan sedimentasi yang berbeda-beda. Oleh karena itu untuk mengetahui metode perhitungan yang paling baik per penelitian guna membandingkan antara metode yang sudah ada di literatur dengan data percobaan di laboratorium.*

*Pada sedimentasi waktu pengendapan efektif terjadi pada keadaan free settling. Dalam literatur, cara yang dapat digunakan untuk menentukan kecepatan sedimentasi tersebut adalah dengan persamaan Stokes-Newton Law, Persamaan Farag, persamaan Fergusson-Church, menggunakan grafik sedimentasi, serta pendekatan dengan metode garis singgung.*

*Bahan yang digunakan dalam percobaan adalah lumpur lapindo yang diambil dari Porong Sidoarjo. Percobaan dilakukan dengan variasi konsentrasi lumpur pada 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6% serta diameter alat sedimentasi yaitu 6 cm; 6,5 cm; 7 cm; 8 cm; 8,5 cm; 10,5 cm. Perhitungan yang dilakukan adalah menentukan harga kecepatan partikel yang mengendap dengan menggunakan metode yang diperoleh dari literatur lalu dibandingkan dengan kecepatan turunnya partikel dari hasil percobaan. Dari hasil ralat yang didapat menunjukkan bahwa pendekatan dengan metode garis singgung menghasilkan cara yang paling mendekati dengan data percobaan, ralat terbesar dengan memakai persamaan garis singgung terjadi pada diameter alat 8,5 cm yaitu sebesar 61,29% dan ralat terkecil terjadi pada diameter alat 10,5 cm sebesar 11,3%.*

**Kata kunci** : sedimentasi, menentukan kecepatan sedimentasi, metode garis singgung

### I. Pendahuluan

Sedimentasi adalah salah satu operasi pemisahan campuran padatan dan cairan (*slurry*) menjadi cairan bening dan *sludge* (*slurry* yang pekat konsentrasinya). Sedimentasi merupakan metode pemisahan antara padatan dengan cairan menggunakan gaya gravitasi.

Proses sedimentasi berperan penting dalam berbagai proses industri, misalnya pada proses pemurnian air limbah, pengolahan air sungai, pengendapan partikel padatan pada bahan makanan cair, pengendapan kristal dari larutan induk, pengendapan partikel terendap pada industri minuman beralkohol, pengendapan bubur kertas atau *pulp* pada industri kertas, umumnya sedimentasi untuk skala laboratorium dilakukan secara *batch*. Data-data yang diperoleh dari prinsip sedimentasi secara *batch* dapat digunakan untuk proses yang sinambung. Selain contoh aplikasi yang sudah disebutkan sebelumnya, sedimentasi untuk industri secara spesifik juga digunakan, antara lain:

1. Pada unit pemisahan, misalnya untuk mengambil senyawa magnesium dari air laut
2. Untuk memisahkan bahan buangan dari bahan yang akan diolah, misalnya pada pabrik gula
3. Pengolahan air sungai menjadi *boiler feed water*.
4. Proses pemisahan padatan berdasarkan ukurannya dalam *clarifier* dengan prinsip perbedaan *terminal velocity*

Pada proses pengeboran minyak bumi umumnya menghasilkan limbah berupa lumpur, limbah lumpur ini ditangani dengan cara sedimentasi. Setelah diendapkan, endapan dipisahkan dari air, dimana air dibuang ke sumber air terdekat seperti sungai atau laut, sedangkan padatan lumpur dikembalikan ketempat pengeboran.

Dalam proses sedimentasi, salah satu faktor yang ikut menentukan waktu sedimentasi adalah kecepatan partikel padatan yang turun ke bawah, sehingga dengan mengetahui kecepatan pengendapan dapat memperkirakan waktu

pengendapan yang efektif guna merancang tempat sedimentasi.

Meskipun banyak aplikasi sedimentasi dalam industri, namun sampai saat ini belum banyak penelitian yang berkaitan tentang proses sedimentasi. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian tentang proses sedimentasi untuk mendapatkan keadaan optimum dalam penggunaannya. Salah satu keadaan optimum yang dibutuhkan adalah penentuan persamaan kecepatan pengendapan dalam penerapan sedimentasi, karena dengan adanya persamaan yang tepat maka aplikasi sedimentasi untuk menentukan suatu kondisi efektif dapat diterapkan dan dapat menurunkan biaya operasi.

Banjir Lumpur Panas Sidoarjo atau Lumpur Lapindo merupakan peristiwa menyemburnya lumpur panas di lokasi pengeboran PT Lapindo Brantas di Desa Renokenongo, Kecamatan Porong, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur, sejak tanggal 27 Mei 2006. Selama ini pembuangan lumpur dialirkan ke laut melalui Sungai Porong dan Aloo meskipun cara ini dapat mencemari kelestarian ekosistem di sekitar aliran sungai. Namun, pembuangan air lumpur ke laut merupakan solusi terbaik yang harus dilakukan karena tanpa pembuangan air lumpur bisa berdampak pada jebolnya tanggul dan akan menimbulkan dampak yang lebih besar bagi masyarakat disekitar tanggul. Air lumpur ini memerlukan penanganan yaitu dengan proses sedimentasi yang optimum agar proses pembuangan air lumpur lebih efektif dari segi waktu. Sehingga perlu penanganan khusus yaitu dengan cara sedimentasi yang efektif untuk memisahkan antara lumpur terhadap air. Salah satu faktor yang mempengaruhi keefektifan proses sedimentasi adalah menentukan waktu sedimentasi lumpur yang efektif melalui perhitungan dengan menggunakan kecepatan sedimentasi.

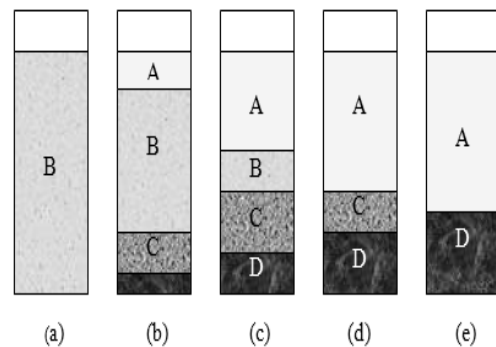
Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan cara yang paling baik guna menentukan kecepatan pengendapan melalui ralat yang dihasilkan dari berbagai metode yang terdapat dalam literatur. Cara yang dilakukan adalah dengan melakukan perhitungan kecepatan pengendapan partikel yang turun dengan menggunakan beberapa metode yang terdapat dalam literatur, lalu hasil perhitungan tersebut dibandingkan dengan kecepatan sedimentasi yang diperoleh dari percobaan di laboratorium.

## II. Tinjauan Pustaka

### II.1. Sedimentasi

Sedimentasi merupakan pemisahan antara padatan dengan cairan yang berasal dari *slurry* encer. Pemisahan ini menghasilkan cairan jernih dan padatan dengan konsentrasi tinggi. Mekanisme dari sedimentasi dideskripsikan dengan observasi pada tes *batch settling* yaitu ketika partikel-partikel padatan dalam suatu *slurry* mengalami proses pengendapan dalam silinder kaca.

Gambar 1(a) menunjukkan suspensi dalam silinder dengan konsentrasi padatan yang seragam. Seiring dengan berjalannya waktu, partikel-partikel padatan mulai mengendap dimana laju pengendapan partikel tersebut diasumsikan sebagai *terminal velocity* pada kondisi *hindered-settling*. Pada Gambar 1(b) terdapat beberapa zona konsentrasi. Daerah D didominasi endapan partikel-partikel padatan yang lebih berat dan lebih cepat mengendap. Pada zona C terdapat partikel dengan ukuran yang berbeda-beda dan konsentrasi yang tidak seragam.



A. Clear Liquid; B. Uniform Concentration; C. Variable size and concentration zone; D. Coarse Solid

**Gambar 1.** Tahapan Proses Pengendapan<sup>[3]</sup>

Daerah B adalah daerah dengan konsentrasi yang seragam dan hampir sama dengan keadaan mula-mula. Di atas daerah B adalah daerah A yang berupa *liquid* jernih.

Jika sedimentasi dilanjutkan, tinggi dari tiap daerah bervariasi seperti pada Gambar 1(c) dan Gambar 1(d). Daerah A dan D semakin luas, sebanding dengan berkurangnya daerah B dan C. Pada akhirnya, daerah B dan C akan hilang dan seluruh padatan akan terdapat pada daerah D sehingga hanya tersisa daerah A dan D. Keadaan seperti ini disebut dengan "*Critical Settling Point*" (ditunjukkan pada Gambar 1(e)), yaitu keadaan dimana terbentuk bidang batas tunggal antara *liquid* jernih dan endapan<sup>[3]</sup>.

## II.2. Pemakaian Proses Sedimentasi

### II.2.1. Proses Batch

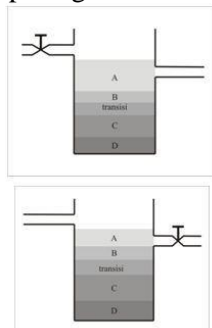
Hingga saat ini, proses *batch* lebih banyak digunakan oleh kalangan industri. Namun, untuk waktu sedimentasi yang digunakan lebih berdasarkan pada pengalaman dan tidak berdasarkan pada teori yang ada. Proses sedimentasi *batch* merupakan proses yang mudah dilakukan. Mekanisme sedimentasi secara *batch* disajikan pada gambar 1.

Gambar 1 menunjukkan *slurry* awal yang memiliki konsentrasi seragam dengan partikel padatan yang seragam di dalam tabung (zona B). Partikel mulai mengendap dan diasumsikan mencapai kecepatan maksimum dengan cepat. Zona D yang terbentuk terdiri dari partikel lebih berat sehingga lebih cepat mengendap. Pada zona transisi, fluida mengalir ke atas karena tekanan dari zona D. Zona C adalah daerah dengan distribusi ukuran yang berbeda-beda dan konsentrasi tidak seragam. Zona B adalah daerah konsentrasi seragam, dengan konsentrasi dan distribusi sama dengan keadaan awal. Di atas zona B, adalah zona A yang merupakan cairan bening.

Selama sedimentasi berlangsung, tinggi masing-masing zona berubah (gambar 1b, 1c, 1d). Zona A dan D bertambah, sedang zona B berkurang. Akhirnya zona B, C dan transisi hilang, semua padatan berada di zona D. Saat ini disebut *critical settling point*, yaitu saat terbentuknya batas tunggal antara cairan bening dan endapan.

### II.2.2. Proses Semi-Batch

Pada sedimentasi *semi-batch*, hanya terdapat cairan keluar atau masuk saja. Jadi, kemungkinan hanya ada *slurry* yang masuk atau beningan yang keluar. Proses sedimentasi *semi-batch* disajikan pada gambar 2.



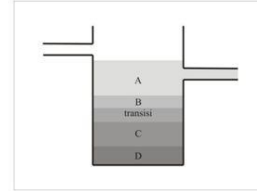
Keterangan :

- A = cairan bening
- B = zona konsentrasi seragam
- C = zona ukuran butir tidak seragam
- D = zona partikel padat terendapkan

**Gambar 2.** Proses Sedimentasi *Semi-Batch*

### II.2.3. Proses Kontinyu

Pada proses kontinyu, terdapat *slurry* yang masuk dan cairan bening yang keluar pada saat yang bersamaan. Saat kondisi *steady state*, maka ketinggian cairan akan selalu tetap. Proses sedimentasi kontinyu disajikan pada gambar 3.



Keterangan :

- A = cairan bening
- B = zona konsentrasi seragam
- C = zona ukuran butir tidak seragam
- D = zona partikel padat terendapkan

**Gambar 3.** Mekanisme Sedimentasi Kontinyu

Kecepatan sedimentasi didefinisikan sebagai laju pengurangan atau penurunan ketinggian daerah batas antara *slurry* (endapan) dan *supernatant* (*liquid* jernih) pada suhu seragam untuk mencegah pergeseran fluida karena konveksi<sup>[4]</sup>.

Pada keadaan awal, konsentrasi *slurry* adalah seragam di seluruh bagian tabung. Kecepatan sedimentasi konstan terlihat pada grafik hubungan antara  $Z_L$  dan  $\theta_L$  (disajikan dalam gambar 5) yang membentuk garis lurus untuk periode awal. Periode ini disebut *free settling*, dimana padatan bergerak turun hanya karena gaya gravitasi. Kecepatan yang konstan ini disebabkan oleh konsentrasi di lapisan batas yang relatif masih kecil, sehingga pengaruh gaya tarik-menarik antar partikel, gaya gesek dan gaya tumbukan antar partikel dapat diabaikan. Partikel yang berukuran besar akan turun lebih cepat, menyebabkan tekanan ke atas oleh cairan bertambah, sehingga mengurangi kecepatan turunnya padatan yang lebih besar. Hal ini membuat kecepatan penurunan semua partikel (baik yang kecil maupun yang besar) relatif sama atau konstan. Semakin banyak partikel yang mengendap, konsentrasi menjadi tidak seragam diikuti bagian bawah *slurry* menjadi lebih pekat. Konsentrasi pada bagian batas bertambah, gerak partikel semakin sukar dan kecepatan turunnya partikel berkurang. Kondisi ini disebut *hindered settling*.

Kondisi *free settling* dan *hindered settling* dapat diamati pada grafik hubungan antara  $Z_L$  dan  $\theta_L$  pada gambar 5, dimana untuk kondisi *free settling* ditunjukkan saat grafik masih berupa garis lurus, sedangkan saat grafik mulai

melengkung merupakan kondisi *hindered settling*.

II.3. Menentukan Kecepatan Sedimentasi

Pada proses sedimentasi, ada berbagai macam cara yang dapat digunakan untuk mendapatkan kecepatan pengendapan, antara lain :

1. Persamaan Stokes-Newton Law.

Jika sebuah partikel turun di dalam fluida karena gaya gravitasi, maka kecepatan pengendapan akan tercapai apabila jumlah dari gaya friksi (*drag force*) dan gaya apung (*buoyancy*) sebanding dengan gaya gravitasi benda<sup>[5]</sup>. Pada sebuah partikel yang mulai tenggelam, kecepatan turunnya partikel dinyatakan dalam persamaan (1).

$$v_s = \sqrt{\frac{4gD_s(\rho_s - \rho)}{3C_d\rho}} \dots\dots\dots(1)$$

Koefisien drag ( $C_d$ ) merupakan fungsi dari *Reynold's number*. Untuk aliran laminar, harga  $C_d$  ditentukan melalui persamaan (2).

$$C_d = \frac{24}{Re} \dots\dots\dots(2)$$

Persamaan *Reynolds number* disajikan pada persamaan (3).

$$Re = \frac{\rho D_s v_s}{\mu} \dots\dots\dots(3)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2) dan (3) ke persamaan (1), maka akan diperoleh persamaan (4).

$$v_s = \frac{gD_s^2(\rho_s - \rho)}{18\mu} \dots\dots\dots(4)$$

dimana  $v_s$  adalah kecepatan pengendapan,  $g$  adalah percepatan gravitasi,  $D_s$  adalah diameter partikel,  $\rho_s$  adalah densitas partikel,  $\rho$  adalah densitas cairan, dan  $\mu$  adalah viskositas cairan.

2. Persamaan Farag

Farag<sup>[9]</sup> merumuskan suatu persamaan yang merupakan penyempurnaan dari persamaan *Stokes-Newton Law*. Persamaan Farag disajikan pada persamaan (5).

$$v = \frac{gd_p^2(\rho_s - \rho_f)\epsilon_f^2}{18\mu_f b} \dots\dots\dots(5)$$

dimana  $b$  adalah konstanta yang diperoleh dari persamaan (6).

$$b = 10^{1,82(1-\epsilon_f)} \dots\dots\dots(6)$$

Dimana,  $v$  adalah kecepatan pengendapan,  $g$  adalah percepatan gravitasi,  $d_p$  adalah diameter partikel,  $\rho_s$  adalah densitas partikel,  $\rho_f$  adalah densitas cairan,  $\mu_f$  adalah viskositas cairan,  $\epsilon_f$

adalah fraksi folome cairan, dan  $\rho_s$  adalah densitas partikel.

3. Persamaan Fergusson-Church

Proses sedimentasi suatu partikel dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain diameter partikel, grafitasi, densitas, serta viskositas. Fergusson dan Church<sup>[6]</sup> merumuskan persamaan kecepatan sedimentasi yang diturunkan dari *Stokes Law* dan *Laminer Drag Law*. Persamaan kecepatan pengendapan disajikan pada persamaan (7).

$$v_s = \frac{SgD^2}{C_1\mu_k + \sqrt{0,75C_2SgD^3}} \dots\dots\dots(7)$$

Definisi dari gravitasi spesifik ( $S$ ) disajikan pada persamaan (8).

$$S = \frac{\rho_s}{\rho} \dots\dots\dots(8)$$

Sedangkan definisi dari viskositas kinematis ( $\mu_k$ ) disajikan pada persamaan (8).

$$\mu_k = \frac{\mu}{\rho} \dots\dots\dots(9)$$

Sehingga persamaan (7) dapat diatur ulang menjadi persamaan (10).

$$v_s = \frac{\rho_s g D^2}{C_1 \mu + \sqrt{0,75 C_2 \rho_s \rho g D^3}} \dots\dots\dots(10)$$

Data untuk  $C_1$  dan  $C_2$  disajikan pada tabel 1.

**Tabel 1.** Tabel Konstanta Persamaan Fergusson-Church

Konstanta	Bola	Diameter Gandum	
		Ayakan	Nominal
$C_1$	18	18	20
$C_2$	0,4	1	1,1

Untuk partikel yang dapat dianggap berbentuk bola, nilai  $C_1=18$  dan  $C_2=0,4$ <sup>[3]</sup>. Substitusi  $C_1$  dan  $C_2$  ke persamaan (10) sehingga diperoleh persamaan (11)

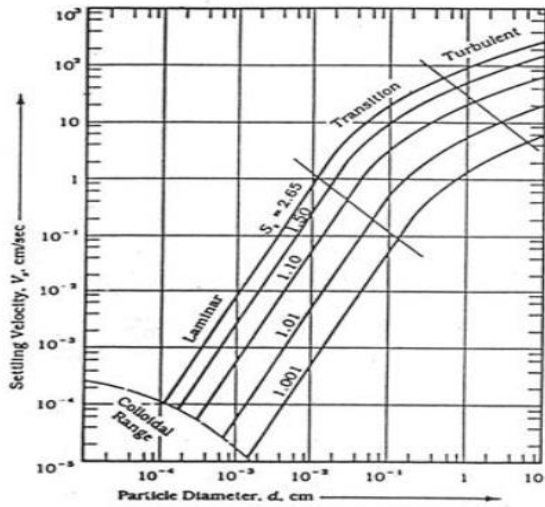
$$v_s = \frac{\rho_s g D^2}{18\mu + \sqrt{0,3\rho_s \rho g D^3}} \dots\dots\dots(11)$$

Dimana,  $v_s$  adalah kecepatan pengendapan,  $g$  adalah percepatan gravitasi,  $D$  adalah diameter partikel,  $\rho_s$  adalah densitas partikel,  $\rho$  adalah densitas air, dan  $\mu$  adalah viskositas air.

4. Metode Grafik.

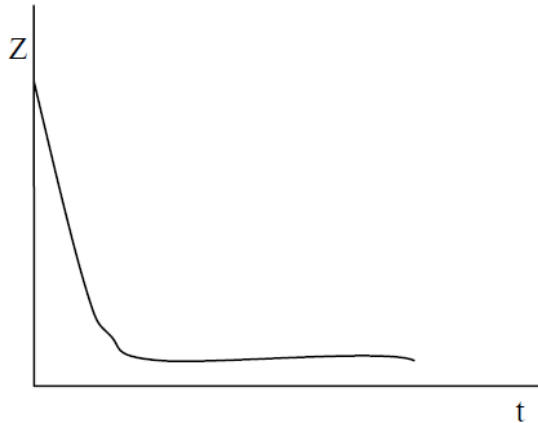
Pada proses sedimentasi, salah satu faktor yang dapat mempengaruhi kecepatan sedimentasi adalah *specific gravity* dan diameter partikel<sup>[7]</sup>. Kecepatan pengendapan sebagai fungsi *specific gravity* dan diameter partikel dapat digambarkan dalam sebuah grafik<sup>[8]</sup>. Grafik kecepatan sedimentasi ditunjukkan pada Gambar 4 dimana  $d$  adalah diameter partikel (cm),  $V_s$  adalah kecepatan pengendapan, dan  $S$

specific gravity. Bila ukuran partikel dan specific gravity dari suatu partikel diketahui maka grafik pada gambar 4 dapat dipakai untuk menentukan kecepatan sedimentasi.



Gambar 4. Grafik Kecepatan Sedimentasi<sup>[8]</sup>

5. Pendekatan dengan metode Garis Singgung  
 Pada suatu proses sedimentasi, hubungan antara waktu pengendapan (t) dengan tinggi endapan (Z) membentuk suatu grafik yang disajikan pada gambar 5.



Gambar 5. Kurva hubungan antara t vs Z pada peristiwa sedimentasi<sup>[10]</sup>

Data-data pada proses sedimentasi dapat diubah kedalam bentuk persamaan matematika. Penentuan bentuk persamaan pada umumnya dilakukan dengan cara linierisasi hubungan kurva. Cara linierisasi hubungan kurva banyak digunakan untuk menentukan persamaan empiris<sup>[10]</sup>. Persamaan empiris yang memiliki ralat paling kecil dalam menentukan waktu sedimentasi<sup>[10]</sup> disajikan pada persamaan (12).

$$Z = ab^t \dots\dots\dots(12)$$

Pada grafik proses sedimentasi, gradien dari garis singgung merupakan kecepatan sedimentasi, dimana persamaan ini memiliki

bentuk yang sama dengan persamaan gradien (m) seperti pada persamaan (13)

$$m = \frac{y - y_1}{x - x_1} \dots\dots\dots(13)$$

Untuk persamaan  $Z = ab^t$ , persamaan gradien garis singgungnya disajikan pada persamaan (14) dan (15)

$$Z' = a(b^t \ln b) \dots\dots\dots(14)$$

$$m = a(b^t \ln b) \dots\dots\dots(15)$$

Sehingga persamaan kecepatan sedimentasi disajikan pada persamaan 16.

$$v = a(b^t \ln b) \dots\dots\dots(16)$$

Dengan v adalah kecepatan pengendapan, a dan b adalah parameter yang diperoleh berdasarkan data percobaan. t adalah turunya partikel. Persamaan ini merupakan pengembangan dari Stokes-Newton Law dengan menambahkan variabel konsentrasi di dalam persamaan.

II.4. Kecepatan Sedimentasi dari percobaan

Pada percobaan sedimentasi, jika data antara waktu pengendapan terhadap tinggi pengendapan dibuat grafik, akan menghasilkan grafik seperti disajikan pada Gambar 5. Kecepatan sedimentasi dari data percobaan dapat dicari dengan persamaan (17)<sup>[16]</sup>

$$v = \frac{Z_n - Z_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \dots\dots\dots(17)$$

Dengan v adalah kecepatan pengendapan, Z adalah tinggi lapisan endapan, t adalah waktu turunya partikel, serta n adalah nomer data percobaan.

III. Metode Penelitian

III.1. Bahan

Bahan yang digunakan dalam percobaan sedimentasi ini adalah lumpur yang diambil dari kawasan Lapindo, Sidoarjo serta air dari PDAM. Lumpur Lapindo tersusun atas 70% air dan 30% padatan dengan ukuran partikel dari 80 mesh - 270 mesh<sup>[1]</sup>. Kadar garam (salinitas) lumpur berkisar antara 38-40%<sup>[2]</sup>.

Karakteristik dari lumpur yang digunakan adalah sebagai berikut<sup>[12]</sup>:

pH	: 6.6-7
CEC	: 3.89-35.42 Me/100
Pb content	: 0.19-0.34 mg/L
Cu content	: 0.19-0.85 mg/L
water content	: 40.41-60.73 %
organic carbon total rate	: 54.75-55.47 %

III.2. Cara Kerja

Pertama-tama, lumpur lapindo dikeringkan dengan oven lalu dihancurkan dengan

menggunakan blender. Kemudian padatan yang sudah dihancurkan diayak dengan ayakan sebesar 80 mesh, padatan yang belum lolos dari ayakan diperkecil lagi dengan blender, kemudian diayak lagi. Hal ini terus dilakukan sampai hampir semua padatan terayak semua. Selanjutnya, bak diisi dengan air, kemudian lumpur dimasukkan dalam bak sebanyak 29,88 g (konsentrasi 1%). Lalu campuran lumpur-air diaduk selama 2-3 menit agar campuran homogen. Setelah itu, campuran dimasukkan dalam tabung silinder kaca sampai setinggi 100 cm. Padatan yang mengendap diukur ketinggiannya setiap 1 menit. Percobaan ini dilakukan pada konsentrasi lumpur 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, dan 6%. Kemudian, percobaan ini diulangi lagi dengan diameter tabung yang berbeda yaitu antara 6 cm; 6,5 cm; 7 cm; 8 cm; 8,5 cm; 10,5 cm. Data-data hasil percobaan selanjutnya digunakan untuk menghitung kecepatan pengendapan pada keadaan *free settling*, lalu hasilnya dibandingkan dengan hasil perhitungan dengan menggunakan persamaan Stoke-Newton, Farag, Fergusson-Church, serta metode grafik dan pendekatan dengan metode garis singgung.

III.3. Analisa Data

Langkah-langkah yang dilakukan untuk menganalisa seluruh data yang diperoleh adalah sebagai berikut :

1. Pemakaian persamaan *Stoke-Newton Law*.

Persamaan kecepatan sedimentasi yang digunakan disajikan pada persamaan (4).

$$v_s = \frac{gD_s^2(\rho_s - \rho)}{18\mu} \dots\dots\dots(4)$$

2. Perhitungan Kecepatan sedimentasi dengan persamaan Farag

Persamaan yang digunakan disajikan pada persamaan (5) dan (6).

$$v = \frac{gd_p^2(\rho_s - \rho_f)\epsilon_f^2}{18\mu_f b} \dots\dots\dots(5)$$

$$b = 10^{1,82(1-\epsilon_f)} \dots\dots\dots(6)$$

3. Mencari kecepatan sedimentasi dengan persamaan Fergusson-Church

$$v_s = \frac{\rho_s g D^2}{18\mu + \sqrt{0,3\rho_s \rho g D^3}} \dots\dots\dots(10)$$

4. Mencari Kecepatan sedimentasi dengan Grafik.

Harga diameter partikel dan *specific gravity* cairan yang digunakan dalam percobaan langsung *diplot* pada grafik yang disajikan pada gambar 4. Dari grafik tersebut dapat diperoleh kecepatan sedimentasi.

5. Kecepatan sedimentasi yang dihitung memakai Pendekatan dengan metode Garis Singgung.

Data hasil percobaan digunakan untuk meng-hitung parameter a dan b, selanjutnya harga a, b, serta waktu turunnya partikel (t) dipakai untuk menentukan kecepatan pengendapan (v) dengan persamaan (16).

$$v = a(b^t \ln b) \dots\dots\dots(16)$$

6. Mencari Kecepatan Sedimentasi dari data percobaan.

Kecepatan sedimentasi dicari pada tiap satuan waktu dengan menggunakan persamaan (17)

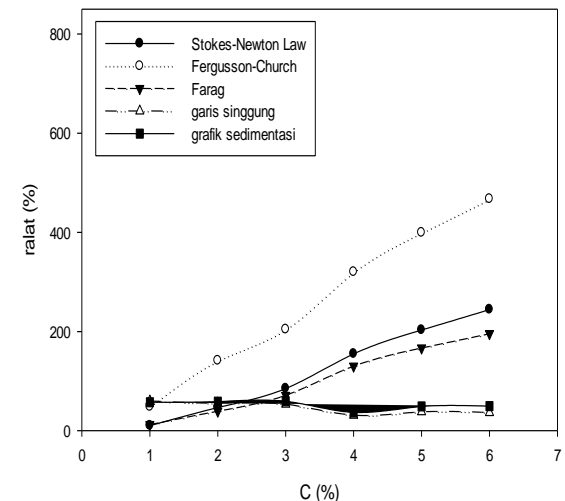
$$v = \frac{Z_n - Z_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \dots\dots\dots(17)$$

Dengan v adalah kecepatan pengendapan, Z adalah tinggi lapisan endapan, n adalah nomer data percobaan, serta t adalah waktu turunnya partikel dari data. Selanjutnya dari beberapa harga v lalu dihitung nilai v rata-rata.

IV. Hasil Penelitian dan Pembahasan

IV.1. Data hasil percobaan

Data hasil percobaan yang berupa konsentrasi (C) versus ralat dapat dinyatakan dengan grafik yang disajikan pada Gambar 6 hingga Gambar 11.



Gambar 6. Hubungan antara Konsentrasi (C) vs Ralat pada Diameter Tabung = 6 cm

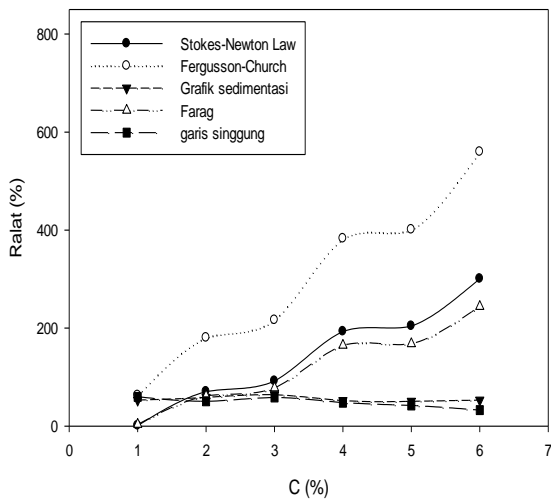
IV.2. Pembahasan

Percobaan dilakukan dengan variasi diameter tabung dari 6 cm hingga 10,5 cm dan variasi konsentrasi sebesar 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%. Pada percobaan dengan variasi konsentrasi, kecepatan sedimentasi semakin menurun seiring dengan meningkatnya konsentrasi *slurry*. Hal ini terjadi karena pada konsentrasi yang lebih tinggi,

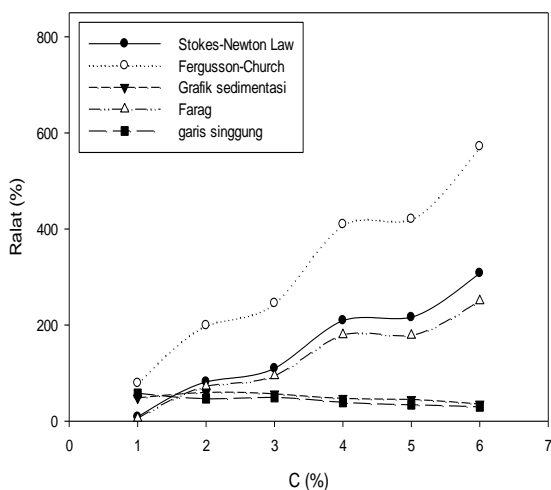
jarak antar partikel padatan pada *slurry* semakin kecil, akibatnya, gaya gesek antar partikel semakin besar, sehingga memperlambat kecepatan partikel turun ke bawah.

Pada percobaan dengan variasi diameter, kecepatan sedimentasi semakin rendah seiring dengan meningkatnya diameter tabung. Hal ini dapat terjadi karena pada tabung dengan diameter yang lebih besar jarak antar partikel padatan lebih besar.

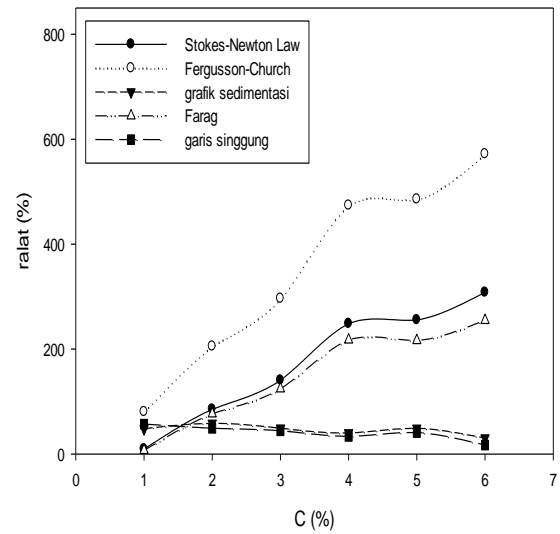
Dalam percobaan ini, persamaan teoritis yang digunakan adalah persamaan Stokes-Newton Law, persamaan Farag, persamaan Fergusson-Church, pembacaan grafik sedimentasi, dan Persamaan garis singgung.



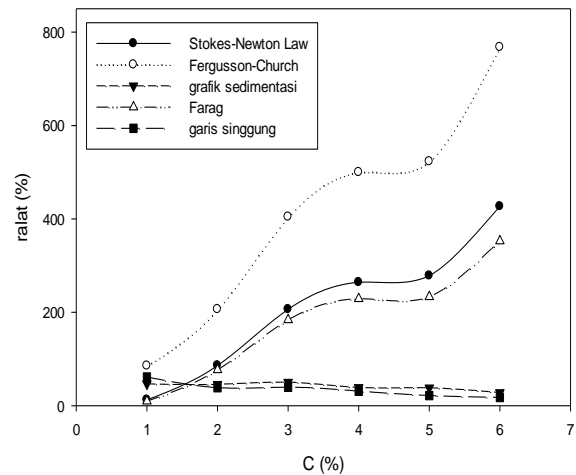
**Gambar 7.** Hubungan antara Konsentrasi (C) vs Ralat pada Diameter Tabung = 6,5 cm



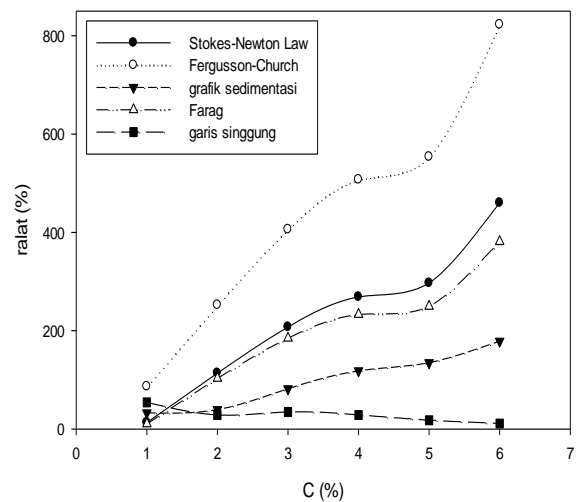
**Gambar 8.** Hubungan antara Konsentrasi (C) vs Ralat pada Diameter Tabung = 7 cm



**Gambar 9.** Hubungan antara Konsentrasi (C) vs Ralat pada Diameter Tabung = 8 cm



**Gambar 10.** Hubungan antara Konsentrasi (C) vs Ralat pada Diameter Tabung = 8,5 cm



**Gambar 11.** Hubungan antara Konsentrasi (C) vs Ralat pada Diameter Tabung = 10,5 cm

Persamaan Stokes-Newton Law, Fergusson-Church, dan pembacaan grafik sedimentasi tidak memiliki variabel konsentrasi. Persamaan-persamaan ini tetap digunakan karena data yang digunakan dalam percobaan hanya data pada saat *free settling*.

Pada *free settling*, gesekan antar partikel tidak berpengaruh terhadap kecepatan sedimentasi, sehingga kecepatan sedimentasi memiliki mekanisme yang sama dengan gerak jatuh bebas. Persamaan Stokes-Newton Law, Fergusson-Church, dan pembacaan grafik sedimentasi menggunakan prinsip gerak jatuh bebas sebagai dasar teorinya. Maka dari itu, ketiga persamaan ini tetap digunakan dalam percobaan meski tidak memiliki variabel konsentrasi.

Untuk persamaan Fergusson-Church, grafik menunjukkan bahwa semakin besar konsentrasi, ralat yang muncul juga semakin besar, bahkan sangat besar hingga diatas 300%. Sehingga Persamaan Fergusson-Church tidak dapat digunakan untuk menghitung kecepatan sedimentasi lumpur. Persamaan Fergusson-Church merupakan persamaan yang lebih cocok untuk aliran turbulen, sementara data percobaan berjalan pada aliran laminar. Akibatnya, hasil yang diberikan berbeda sangat jauh.

Untuk hasil pembacaan grafik sedimentasi, ralat yang diberikan pada awalnya turun seiring dengan peningkatan konsentrasi, tetapi setelah mencapai konsentrasi antara 3%-5% ralatnya semakin meningkat. Karena semakin besar konsentrasi tumbukan yang terjadi antar partikel semakin besar, sedangkan grafik sedimentasi yang dibuat pada kondisi *free settling*, dimana pada kondisi *free settling* dapat dianggap tidak ada tumbukan antar partikel, yang ada hanya gesekan antara dinding partikel padatan dengan cairan yang membuat terjadinya *drag force*.

Data yang digunakan untuk membuat grafik sedimentasi hanya didapatkan pada satu macam konsentrasi. Padahal, dengan semakin meningkatnya konsentrasi, *drag force* yang dialami juga semakin besar. Begitu pula sebaliknya, data dengan konsentrasi yang lebih kecil hampir tidak memiliki efek *drag force*. Karena itulah, ketika data pembacaan grafik sedimentasi dibandingkan dengan data hasil percobaan aktual dengan konsentrasi yang lebih tinggi atau lebih rendah, hasil ralat yang muncul juga lebih besar. Selain itu, seiring dengan meningkatnya diameter tabung, peningkatan ralat juga semakin besar. Maka, pembacaan grafik sedimentasi hanya dapat diterapkan untuk

kecepatan sedimentasi pada konsentrasi antara 3% sampai 5%.

Untuk persamaan Stokes-Newton Law, ralat yang diberikan pada konsentrasi 1% masih sangat rendah, tetapi seiring dengan meningkatnya konsentrasi, ralat yang terjadi mengalami kenaikan yang besar. Hal ini disebabkan karena hukum Stokes digunakan untuk benda jatuh bebas dan tidak mengalami tumbukan antar partikel. Selain itu, semakin besar diameter tabung, peningkatan ralat yang dialami juga semakin tinggi. Hal ini terjadi karena semakin besar diameter tabung, maka kecepatan sedimentasi juga semakin rendah. Maka, persamaan Stokes-Newton Law hanya cocok untuk menghitung kecepatan sedimentasi lumpur dengan konsentrasi yang rendah dan diameter tabung yang kecil.

Untuk persamaan Farag, hasil ralat yang diberikan memiliki tren yang sama dengan persamaan Stokes-Newton Law, akan tetapi pada konsentrasi yang sama, ralat yang diberikan lebih kecil, sehingga persamaan ini masih lebih bagus jika dibandingkan dengan persamaan Stokes-Newton law. Persamaan Farag merupakan hasil pengembangan dari persamaan Stokes-Newton Law dengan memperhitungkan variabel konsentrasi padatan dalam *slurry* dimana hal ini terlihat dengan adanya variabel fraksi cairan dalam persamaan Farag. Tetapi, karena persamaan Farag juga digunakan untuk benda jatuh bebas, sehingga untuk konsentrasi yang besar persamaan farag juga mempunyai ralat yang besar. Sama seperti persamaan Stokes-Newton Law, persamaan ini lebih cocok untuk menghitung kecepatan sedimentasi lumpur pada konsentrasi rendah.

Untuk metode dengan menggunakan persamaan dari metode garis singgung ralat yang diberikan lebih kecil jika dibandingkan dengan ralat dari persamaan yang lain. Dan juga, ralat yang diberikan mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya konsentrasi lumpur. Selain itu, seiring dengan meningkatnya diameter tabung, penurunan yang dialami juga semakin besar.

Persamaan dasar untuk penurunan persamaan dari metode garis singgung berasal dari data percobaan sehingga persamaan dasar ini juga memperhitungkan adanya tumbukan antar partikel. Akibatnya metode ini menghasilkan ralat yang kecil. Maka persamaan ini paling cocok untuk digunakan menghitung kecepatan sedimentasi lumpur pada konsentrasi tinggi dan pada diameter wadah yang



besar.Kelemahan dari persamaan ini adalah persamaan ini membutuhkan data sedimentasi antara waktu versus tinggi endapan.

## V. Kesimpulan

Dari percobaan ini, dapat ditarik kesimpulan:

- Untuk konsentrasi lumpur yang encer, persamaan yang paling cocok adalah persamaan Farag.
- Untuk lumpur dengan konsentrasi yang tinggi, persamaan yang paling cocok adalah persamaan garis singgung.

Untuk diameter tabung yang besar, persamaan yang paling cocok adalah persamaan garis singgung.

## Daftar Pustaka

- [1] Usman E., Salahuddin M., Ranawijaya DAS., dan Hutagaol J. P., 2006, "Pembuangan Lumpur Porong-Sidoarjo ke Laut", Paper Pendukung Simposium Nasional, Surabaya.
- [2] Arisandi P., 2006, "Menebar Bencana Lumpur di Kali Porong" Ecological Observation And Wetlands Conservation, Jakarta.

- [3] Brown C.B., 1950, "Sediment Transport, in Engineering Hydraulics", Ch. 12, Rouse, H. (ed.), John Wiley and Sons, New York
- [4] Foust A.S., 1980. "Principle of Unit Operation", 4 ed., John Wiley and Sons, New York,
- [5] Batchelor G.K., 1967. "An Introduction to Fluid Dynamics", Cambridge University Press, Cambridge.
- [6] Fergusson R.I. and Church M., 2004 "Sedimentation" *Journal of Sedimentary Research* 933-937.
- [7] Abuzar S.S., 2010, "Sedimentasi", Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya.
- [8] Tyoso B.W., 1991, "Pengolahan Data Secara non Statistik", PT Pupuk Sri Wijaya, Palembang,.
- [9] Farag I., 1996, "Fluid Flow", East Williston, New York.
- [10] Setiyadi, 2006, "Seminar Nasional Teknik kimia", Teknik Kimia, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung,.
- [11] Geankoplis C.J., 1993, "Transport Processes and Separation Process Principles", 4 ed., Pearson Education International, USA,
- [12] Alvin J., 2013, "Characteristic of Lapindo Mud and the Fluctuation of Lead and Copper in Porong and Aloo Rivers", Universitas Brawijaya, Malang,